Per Passione

Margherita Hack

# Dal sistema solare ai confini dell'Universo

Liguori Editore

*Margherita Hack*

# Dal sistema solare ai confini dell'Universo

Liguori Editore

# Indice

Tutte le volte che qualcuno mi intervista o mi chiede notizie del mio lavoro, immancabilmente mi domanda: “Ma che età aveva quando è cominciata la sua passione per l’astronomia?” È una domanda che mi fa arricciare il pelo come ai gatti carezzati contropelo. Da bambina avevo ben altre passioni, i giochi sfrenati ai giardini pubblici, le gare a palla o di corsa, le arrampicate sugli alberi, il più in alto possibile; da giovane la passione l’ho avuta per lo sport, soprattutto per quello fatto da me, le gare di atletica, la voglia di vincere e primeggiare, mentre a scuola non ho mai avuto grandi passioni, ma ho solo studiato con serietà perché quello allora era il mio lavoro, né amato né odiato. È solo all’università quando ho iniziato il corso di laurea in fisica che ho cominciato a studiare con interesse, con vero piacere, ma dire passione sarebbe esagerato. E oggi, dopo sessant’anni spesi facendo ricerca e insegnando astrofisica agli studenti del terzo e quarto anno di fisica, o cercando di spiegare al pubblico digiuno di fisica come funziona la macchina dell’Universo, provo passione per il mio lavoro? Direi ancora che passione è un parolone troppo grosso. Piuttosto provo sempre meraviglia per quanto siamo riusciti a capire dell’Universo, delle sue origini, della sua evoluzione, delle leggi universali che lo regolano, e come da tutto questo si risalga anche alla nostra stessa origine. Nello spiegare al pubblico o agli studenti come

funziona una stella, come si formano i pianeti, quale siano le probabilità di altre forme di vita nell'Universo, come le galassie si raggruppano nello spazio, mi entusiasma il notare quale straordinaria palestra di fisica sia l'astrofisica. Si utilizzano le leggi della meccanica e della gravitazione per spiegare i moti dei corpi celesti, l'ottica per la costruzione dei telescopi, l'elettromagnetismo e la fisica atomica per interpretare gli spettri stellari, la fisica nucleare per spiegare le fonti dell'energia stellare; la teoria della relatività trova numerose conferme dalle più svariate osservazioni astronomiche, la fisica quantistica governa un Universo primordiale popolato da particelle elementari; nell'Universo incontriamo la materia nello stato rarefatto degli spazi intergalattici e nello stato ultradenso delle stelle di neutroni. Quale laboratorio terrestre può offrirci tutta questa varietà di esperimenti?

Ho provato la soddisfazione di aver dato un contributo alla soluzione di qualche enigma stellare, quella di aver avuto degli allievi oggi ben noti in campo internazionale, e di aver capito quanto sia utile fare divulgazione, non solo per fare amare la scienza ai giovani e ai meno giovani, ma anche perché cercare di spiegare agli altri con parole semplici concetti difficili ha aiutato soprattutto me a capirli meglio. In conclusione sono stati sessant'anni in cui mi sono divertita lavorando, e quindi sono stata una persona fortunata, sono stata pagata per divertirmi. Agli studenti del terzo e quarto anno di fisica posso parlare di passione per il mio lavoro?

# Introduzione

Durante un forzato soggiorno al Polo cardiologico di Cattinara (il grande ospedale di Trieste) sulle alture carsiche che circondano la città, dalla grande finestra rivolta ad oriente vedevo ogni mattina il cielo cominciare a tingersi di rosa e mi venivano in mente i versi di Omero che annunciava l'arrivo dell'"aurora dalle dita di rosa"; poi a seconda della distribuzione ed estensione delle nuvole ogni giorno si assisteva ad uno spettacolo diverso di forme e colori dal rosa intenso all'azzurro al grigio, fino a che la luce accecante del sole che spuntava dietro la collina esplodeva. Mi immaginavo allora i sentimenti dei nostri antenati preistorici che forse ogni notte si domandavano se il sole sarebbe tornato di nuovo a riscaldarli dopo le lunghe ore di oscurità; che erano terrorizzati da ogni fenomeno inusuale, un'eclisse di sole o di luna, l'apparizione di una cometa, le stesse fasi lunari. Poi pian piano, nel corso dei secoli, le ripetute osservazioni dei moti del sole, della luna e delle stelle cominciavano ad apparire più chiari, ma comunque quante divinità popolavano i cieli e la terra; ogni fenomeno naturale veniva spiegato dall'azione di un dio. Leggendo l'*Odissea* ci rendiamo conto che ai tempi di Omero (siamo fra l'ottavo e il settimo secolo a.C.) gli dei erano onnipresenti nella vita degli uomini, e ne decidevano le sorti in base alle loro simpatie o antipatie.

Ma anche molti secoli dopo l'evidenza scientifica non poteva contraddire quanto scritto nei sacri testi; per questo Giordano Bruno fu mandato al rogo il 17 febbraio 1600 e Galileo fu costretto ad abiurare. Ancora oggi in molti paesi islamici la legge è quella dettata dal Corano, e anche nei nostri paesi laici una buona percentuale della popolazione spiega l'origine dell'universo, l'origine della vita e insomma tutto quello che la scienza non sa ancora spiegare con un Dio creatore. Si va diffondendo l'idea che il creazionismo possa essere opposto alla teoria evolutiva darwiniana con pari dignità scientifica.

Ma sempre ci sono stati spiriti liberi che non si sono accontentati delle spiegazioni soprannaturali. Straordinaria è la modernità del "laico" Tito Lucrezio Caro, vissuto nel primo secolo a.C., che nella sua opera *De rerum natura* esalta la ragione (*ratio*) per vincere le superstizioni che egli classifica come *religio*. Nel libro primo scrive:

> Mentre la vita umana giaceva sulla terra, / turpe spettacolo, oppressa dal grave peso della religione, / che mostrava il suo capo dalle regioni celesti con orribile / aspetto incombendo dall'alto sugli uomini, / per primo un uomo di Grecia ardì sollevare gli occhi / mortali a sfidarla, e per primo drizzarlesi contro: / non lo domarono le leggende degli dèi, né i fulmini, né il minaccioso / brontolio del cielo; / anzi tanto più ne stimolarono / il fiero valore dell'animo, così che volle / infrangere per primo le porte sbarrate dell'universo (vv. 62-72).

E a proposito del terrore mi ricordo i racconti della mamma – quindi siamo già agli inizi del '900, su come si

fosse definitivamente allontanata dalla religione, quando si era trovata a passare qualche mese come istitutrice in un collegio di monache, che terrorizzavano le bambine con i loro racconti sulle fiamme dell'inferno.

E ancora Lucrezio esalta la vittoria della ragione sulla religione:

> Perciò a sua volta abbattuta sotto i piedi della religione / è calpestata, mentre la vittoria ci eguaglia al cielo (vv. 77-79).

Lucrezio dopo aver sottolineato che è stato un greco a osare, osserva come sia difficile riportare in latino, dove mancano i termini adeguati, la difficile dottrina greca.

Anche per questo, quando si discuteva se la Costituzione europea dovesse o meno far riferimento alle radici cristiane, pensavo e credo che si debba piuttosto far riferimento alle radici dell'antica Grecia, che hanno fatto dell'Europa la culla della razionalità, e dove è nata la scienza moderna.

Pensando all'idea di Dio concepita da molti scienziati e filosofi, come per esempio Einstein o Spinoza, Dio sarebbe il creatore dell'Universo, ma completamente indifferente alle vicende degli esseri da lui creati, ben diverso dal Dio delle varie religioni, padre amorevole o severo, che premia e punisce i suoi figli. Un Dio così indifferente potrebbe benissimo identificarsi con il bosone di Higgs, quella particella che fornirebbe la massa a tutte le altre. Il modello standard costruito dai fisici per spiegare l'universo delle particelle prevede che esista e abbia una massa

almeno 100 volte quella del protone. Non è stato ancora osservato, perché l'energia fornita dalle attuali macchine acceleratrici non è sufficiente e si assiste a una gara fra fisici europei al CERN col Large Hadron Collider (LHC) che sta per entrare in funzione e fisici americani col Tevatron a chi riuscirà a scoprirlo prima. Se sarà scoperto e sarà confermata la previsione teorica che è il bosone di Higgs a fornire la massa a tutte le altre particelle che costituiscono tutto ciò che esiste, sarebbe esso in realtà il creatore dell'intero universo e quindi un dio del tutto indifferente verso le sue creature. Sarebbe un dio perfettamente accettabile dagli atei e resterebbe senza senso e senza risposta la domanda del perché di questo comportamento di materia e energia.

Sono molte le domande a cui la fisica delle particelle, l'astrofisica e la cosmologia cercano di rispondere. Per esempio quando si parla del big bang si pensa all'inizio dell'universo. Ma in realtà non sappiamo se sia stato veramente un inizio o piuttosto un cambiamento delle condizioni fisiche dell'universo causate da un'esplosione di energia che ha dato luogo all'espansione di un universo infinito nel tempo e nello spazio. Non sappiamo nemmeno se questo che osserviamo sia veramente l'universo, cioè tutto ciò che esiste, oppure se esistano altri universi. Sono domande a cui è probabilmente impossibile dare una risposta.

È possibile viaggiare nel tempo? In un certo senso lo facciamo già, per lo meno nel passato. Infatti quando osserviamo una lontana galassia situata a 13 miliardi di anni

luce la vediamo com'era 13 miliardi di anni fa. Addirittura gli strumenti in grado di misurare le microonde (radiazioni fra circa 1 mm e qualche cm) ci hanno mostrato l'immagine dell'universo quando erano passati solo 400.000 anni dal big bang. Quando i nostri telescopi osservano l'esplosione di una supernova, noi assistiamo "in diretta" alla morte di una stella, che però è avvenuta migliaia o milioni di anni fa a seconda se la sua distanza da noi è di migliaia o milioni di anni luce. Ma per quanto riguarda il futuro? Sarà mai possibile osservarlo? La teoria della relatività di Einstein ci dice che in certe condizioni sarebbe possibile. Infatti un dato intervallo di tempo per un viaggiatore in moto, misurato da un orologio fermo rispetto al viaggiatore sarà più corto di quello trascorso per un osservatore a riposo. Però per avere delle differenze sensibili bisogna viaggiare a velocità molto alte, prossime a quelle della luce (300.000 km/sec). Supponiamo per esempio che un astronauta possa raggiungere velocità pari a 0,95 volte la velocità della luce. Si trova che mentre per un osservatore rimasto a terra sono passati 100 anni, per l'astronauta saranno passati solo 31 anni. Quando il nostro viaggiatore, partito per es. nel 2010, all'età di 30 anni tornerà a casa, sessantunenne, il calendario gli dirà che siamo nel 2110 e avrà la brutta sorpresa di non trovare più nessuno dei suoi familiari e dei suoi amici, e anche il più piccolo dei suoi figli che aveva lasciato ancora in fasce è un vecchietto ormai centenario. Come sarà cambiata la vita sulla Terra? Pensiamo se fosse successo a uno dei nostri genitori. Partiti nel 1900 troverebbero al loro ritorno un mondo i cui cieli

sono solcati da jet giganteschi, alcuni astronauti di nazioni diverse che vivono e lavorano nella stazione spaziale e di cui nemmeno ci si ricorda, tanto ormai siamo abituati alle imprese spaziali. Troverebbero che è possibile comunicare quasi istantaneamente con paesi all'altro capo del mondo, sia per telefono che per televisione, si meraviglierebbero di vedere le strade affollate non più di carrozze a cavalli ma di auto e di persone che camminano parlando e gesticolando da sole con una scatoletta attaccata all'orecchio.

Ma quali prove abbiamo che le cose stiano proprio così? Ce le ha date una particella che si forma quando i raggi cosmici (che sono fasci di particelle aventi energie – o ciò che è lo stesso – velocità quasi eguali a quelle della luce) interagiscono con l'atmosfera terrestre. Nell'urto si formano dei "muoni", particelle instabili, che dalle osservazioni fatte con gli acceleratori di particelle sappiamo che hanno una vita di circa 2 milionesimi di secondo. Per compiere il tragitto dalla sommità dell'atmosfera al suolo – circa 30 km – anche viaggiando alla velocità della luce impiegherebbero un decimillesimo di secondo, un tempo molto più lungo della durata della loro vita: quindi non dovrebbero arrivare indenni ai nostri misuratori, e invece ci arrivano perché per loro il tempo scorre molto più lentamente. Ammesso per es. che la loro velocità sia pari a 0,9999999 la velocità della luce il loro tempo scorrerebbe migliaia di volte più lentamente. Se un immaginario osservatore potesse viaggiare a cavallo di uno di questi muoni non si accorgerebbe della dilatazione del tempo, perché anche gli stessi battiti del suo cuore, e tutte le sue funzioni

vitali sarebbero egualmente rallentate. Solo quando sarebbe ritornato sulla Terra, troverebbe che sono passati secoli o addirittura millenni.

Altre ancora sono le domande che le attuali osservazioni dell'universo ci pongono. In particolare è veramente fonte di meraviglia il sapere che noi conosciamo solo il 4% circa della materia presente nell'universo, mentre il 23% è "materia oscura" cioè materia che fa sentire la sua presenza tramite la sua forza di gravità, ma che non emette nessun tipo di radiazione, e che non sappiamo cosa possa essere. Il rimanente 73% è sotto forma di energia. Un'altra sorpresa è venuta dalle più recenti e accurate misure dell'espansione dell'universo: si riteneva che la forza di gravità esercitata dalla stessa materia presente nell'universo dovesse frenare l'espansione; ci si aspettava di osservare che l'espansione indicata dalle più lontane galassie – che ci mostrano il più remoto passato dell'universo – avvenisse più rapidamente di quella indicata dalle galassie relativamente vicine. Invece si è trovato al contrario che l'espansione non decelera ma accelera. Qual è l'energia che accelera l'espansione? Non lo sappiamo e perciò si parla di "energia oscura".

Tante scoperte inaspettate hanno fatto galoppare la fantasia degli scienziati che hanno cominciato a immaginare universi che solo le equazioni matematiche possono rappresentare ma che i nostri sensi non riescono a visualizzare. Per esempio è possibile immaginare che oltre alla materia conosciuta e a quella di cui conosciamo la presenza ma che non sappiamo cosa sia, come la materia oscura,

ci si un terzo tipo di materia completamente sconosciuta e quindi anche altri insospettati universi.

Si è immaginato che esistano altre dimensioni oltre alle nostre tre spaziali e la quarta temporale, e altri universi con numero di dimensioni diverso dal nostro. Provate a immaginare una quarta o quinta dimensione spaziale, oltre alle nostre tre – altezza, larghezza e lunghezza – vi accorgerete che noi creature tridimensionali non siamo capaci di visualizzare una simile realtà, ma solo di rappresentarla con equazioni matematiche.

# L'Universo degli antichi

L'astronomia, è ritenuta scienza pura per eccellenza, anche se oggi i viaggi spaziali ne fanno una scienza con grandi applicazioni pratiche. Ma invece è stata la più antica delle scienze, nata proprio per soddisfare alle esigenze di sopravvivenza degli uomini preistorici. L'alternarsi del giorno e della notte, la misura del tempo stimata dall'altezza del sole sull'orizzonte, l'alternarsi delle stagioni, erano di grande importanza per l'agricoltura e la caccia. All'epoca dei primi viaggi per mare le stelle guidavano i naviganti e l'importanza dell'astronomia per la navigazione è rimasta fondamentale fino all'inizio del XX secolo, prima delle invenzioni del telegrafo senza fili, del telefono, della radio e infine dei radar.

L'universo degli antichi, per tutte le popolazioni, è stato quello suggerito dalla immediata percezione dei nostri sensi, una volta celeste immaginata come una sfera ruotante da est a ovest al cui centro si trova la Terra, su cui sono infisse le stelle e su cui si muovono i cinque pianeti osservabili a occhio nudo – Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno, oltre al Sole e alla Luna. Ogni popolazione ha identificato questi corpi così misteriosi e irraggiungibili con divinità più o meno strettamente interessate alla Terra e ai suoi abitanti, e ha creduto di vedere gesta di eroi in quelle configurazioni arbitrarie che si ottengono congiungendo con linee immaginarie le stelle apparentemente vicine fra loro.

Le più antiche nozioni di astronomia di cui abbiamo scarse e incerte notizie risalgono ad almeno 2000 anni a.C. e si sono sviluppate presso i Sumeri e gli Assiro-Babilonesi nella regione fra l'Eufrate e il Tigri, nell'odierno Iraq meridionale e settentrionale rispettivamente, e poi presso i Caldei, ancora nell'Iraq meridionale.

Anche in Egitto le osservazioni astronomiche erano assai sviluppate, e soprattutto importante era conoscere la data del sorgere di Sirio al mattino (la cosiddetta levata eliaca), perché quando questo avveniva preannunciava le inondazioni del Nilo, così importanti per l'agricoltura. Nel 3000 a.C. la levata eliaca avveniva il 22 giugno e l'inizio dell'inondazione il 25 giugno; a causa della precessione degli equinozi e del moto proprio di Sirio nel 2000 a.C. la levata eliaca si era spostata al 30 giugno e quindi non aveva più la proprietà di avvisare l'imminenza dell'inondazione che aveva avuto nei secoli precedenti.

In Cina l'astronomia era già abbastanza sviluppata 2000 anni a.C. ma dati più attendibili si hanno solo a partire dal 1000 a.C. Si racconta che due astronomi, Hi e Ho, mancarono al loro dovere di predire un'eclisse di sole e per questo furono condannati alla decapitazione. Dalla data riportata e dalla posizione, gli astronomi moderni ritengono che dovesse trattarsi dell'eclisse del 22 ottobre del 2137 a.C. Però è inverosimile che già a quei tempi così remoti ci fossero le conoscenze per predire un'eclisse, e si deve concludere che il racconto è inattendibile. Invece un importante contributo all'astronomia del XX secolo è giunto proprio grazie all'attendibilità delle osservazio-

ni cinesi fatte circa 32 secoli più tardi, nel 1054 d.C. Si tratta di una nebulosa caratteristica per la sua forma e le sue proprietà fisiche. Si chiama "nebulosa del Granchio", perché sulla macchia biancastra di diametro angolare pari a circa 6 minuti d'arco (si tenga presente che il diametro angolare del Sole e della Luna è di circa 32 minuti d'arco o poco più di mezzo grado) si notano dei filamenti che ricordano le zampe di un granchio. Le osservazioni dei moderni telescopi hanno indicato che tutta la nebulosa sta espandendo in direzione radiale (cioè verso l'osservatore) a una velocità di circa 1000 km/sec e che il suo diametro cresce di 0,2 secondi d'arco all'anno. Da questi dati si ricava facilmente che la distanza della nebulosa è circa 3600 anni luce[1].

[1] L'angolo di 0,2″ espresso in radianti (che si ottiene dividendo 0,2″ per 206.265″, numero di secondi contenuti in un radiante) rappresenta la distanza percorsa in un anno dal bordo in espansione della nebulosa, diviso per la distanza *d* della nebulosa stessa. Ammettendo che la velocità di espansione sia la stessa sia in direzione radiale (1000 km/sec misurata grazie agli spostamenti delle righe spettrali dovuto all'effetto Doppler) che tangenziale, si può scrivere l'equazione $0.2''/206265'' = (1000 \text{ km/sec. } 31.357.000)/d$ dove 31.357.000 è il numero di secondi contenuto in un anno. In questo modo abbiamo espresso anche l'espansione in direzione radiale nella stessa unità – radianti all'anno – in cui è espressa l'espansione tangenziale. Risolvendo si trova $d = 3{,}25 \times 10^{16}$ km pari a circa 3600 anni luce. Essendo ora nota la distanza e il raggio angolare della nebulosa che è circa 3′ si trova che il raggio lineare è 3,14 anni luce o $2{,}8 \times 10^{13}$ km. Alla velocità di 1000 km/sec la nebulosa avrebbe raggiunto le dimensioni attuali in circa 900 anni. Quindi 900 anni fa sarebbe stata ancora una stella, in accordo con le osservazioni dei cinesi.

Poiché le caratteristiche fisiche della nebulosa indicano che si tratta di ciò che rimane dell'esplosione di una supernova, si trova che per raggiungere le dimensioni attuali – circa 6 anni luce, pari a circa 50.000 miliardi di km – partendo da quelle tipiche di una stella – qualche milione di km – espandendo alla velocità di 1000 km/sec ci sono voluti circa 900 anni. Vari testi cinesi riportano che nell'anno 1054 nella costellazione del Toro vicino alla stella Zeta era apparsa una stella "ospite", cioè l'improvvisa apparizione di un oggetto molto splendente, visibile addirittura in pieno giorno. La posizione indicata dai cinesi con grande precisione coincide con quella in cui si trova la nebulosa del Granchio. Se ne deduce quindi che essa altro non è che il residuo di quella esplosione avvenuta quasi 1000 anni fa. Al centro della nebulosa è stata trovata anche una stella di neutroni, cioè una stella di diametro straordinariamente piccolo per una stella, una diecina di km, e densità talmente alta da far sì che protoni ed elettroni siano per così dire incollati insieme a formare dei neutroni. Queste osservazioni sono una bella conferma delle previsioni teoriche, secondo cui ciò che resta di una stella esplosa è un nocciolino superdenso – quasi un milione di miliardi di volte la densità dell'acqua, con un raggio di pochi chilometri, circondato da una nube in espansione, nel cui campo magnetico si muovono vorticosamente elettroni liberi, dando luogo ad emissione di radiazione, simile a quella che si osserva nei sincrotroni. Si tratta dunque di un vero e proprio sincrotrone naturale.

La nebulosa del Granchio è dunque uno straordinario esempio di come le osservazioni degli antichi astronomi e quelle dei nostri contemporanei possano integrarsi e completarsi a vicenda.

Sebbene si tratti dell'osservazione più completa e accurata di un fenomeno che dura da più di un millennio, esso non è l'unico. Ci sono numerosi testi antichi che riportano l'osservazione di fenomeni analoghi e seguendo le loro indicazioni, in molti casi sono state scoperte deboli nebulose, resti di esplosioni stellari che altrimenti non sarebbero state notate.

L'astronomia era assai sviluppata anche nell'America centrale e meridionale. Sia in Messico che in Guatemala e nello Yucatan gli archeologi hanno trovato numerose tracce delle conoscenze astronomiche di quei popoli. In particolare i Maya avevano un calendario molto elaborato che risale ad almeno cinque secoli prima di Cristo e sapevano prevedere le date delle eclissi di sole e di luna. È una civiltà che si è sviluppata in maniera completamente autonoma da quella occidentale e asiatica, ma che aveva raggiunto conoscenze paragonabili a quelle dei babilonesi e degli egiziani. È interessante notare come popoli così lontani, in ambienti e climi così diversi, senza mai essere venuti in contatto fra loro abbiano sviluppato conoscenze e miti simili.

# L'astronomia greca

Non per nulla la parola “democrazia” è una parola greca. Infatti la civiltà che si stava sviluppando in Grecia differiva da quella dei popoli dell'Egitto, della Mesopotamia, della Cina dominati da potenti dinastie di imperatori e in cui la scienza e in particolare l'astronomia erano appannaggio della casta dei sacerdoti. In Grecia, la cui natura geologica e geografica è caratterizzata da un paesaggio montuoso e sparso fra numerose isolette era più difficile la nascita di un potere centrale; inoltre le condizioni geologiche poco adatte allo sviluppo di un'agricoltura in grado di nutrire tutta la popolazione hanno favorito la formazione di una classe di navigatori. Questi erano naturalmente gli individui più avventurosi e indipendenti, capaci di formare numerose colonie sulle coste mediterranee arrivando fino a Marsiglia a ovest e in Crimea a est.

Malgrado i numerosi dei che popolano la mitologia greca e che stando alla narrazione di Omero nell'Iliade e nell'Odissea prendono parte attiva a tutte le vicende umane, la scienza e la filosofia greca sono il più antico esempio di pensiero laico. La scienza non è più riservata ai sacerdoti, ma è aperta a tutti. Racchiusa fra le orde barbariche del nord Europa e gli imperi dispotici dell'Asia, la Grecia rappresenta la culla della democrazia moderna, di cui il mondo occidentale è l'erede.

Ecco i nomi di scienziati e filosofi che rappresentano le pietre miliari della scienza antica: Talete di Mileto 624-547 a.C.; Pitagora 589-500 a.C.; Anassagora 500-428 a.C.; Empedocle 494-434 a.C.; Socrate 470-399 a.C.; Democrito 470-400 a.C.; Platone 427-347 a.C.; Eudosso di Cnido 406-355 a.C.; Eraclide Pontico 388-315 a.C.; Aristotele 384-322 a.C.; Aristarco di Samo 310-230 a.C.; Euclide circa 300 a.C.; Archimede 287-212 a.C.; Eratostene 273-192 a.C.; Ipparco 190-126 a.C.; Tolomeo 100-170 d.C.

Secondo i pensatori di Mileto, di cui Talete è il più antico rappresentante, l'intero universo funziona allo stesso modo di quel pezzettino che è sotto il nostro controllo. Questa intuizione trova conferma nella scienza moderna, che ha scoperto le leggi universali – la gravitazione, l'elettromagnetismo, le interazioni forte e debole – che governano l'universo, la uniformità della composizione chimica dei corpi celesti, e dello stesso nostro corpo, tutti composti degli stessi atomi generati nel corso dell'evoluzione dell'universo e in particolare delle stelle.

Pitagora è ben noto anche ai ragazzini delle medie per il suo teorema; a lui sono state attribuite varie scoperte in matematica e geometria e la sfericità della Terra, che però era probabilmente già nota ai naviganti, e che alcuni attribuiscono a Talete. Pitagora fu probabilmente il primo a capire che l'astro della sera e quello del mattino era lo stesso oggetto – Venere –, il corpo più splendente dopo il Sole e la Luna.

Anassagora proclamò "la mente" il motore dell'universo e fu il primo ad affermare chiaramente che la Luna

brilla della luce riflessa del Sole e che le eclissi lunari avvengono quando la Terra si frappone fra il Sole e la Luna, il che può avvenire soltanto alla fase di Luna piena.

Il suo contemporaneo, l'agrigentino Empedocle espone la dottrina dei quattro elementi costituenti l'universo: aria, acqua, terra e fuoco. Oggi sappiamo che gli elementi presenti in natura sono 92, ma già allora c'era il desiderio di trovare dei componenti comuni a tutto l'universo.

Socrate considerava con un certo disprezzo lo studio della natura e così pure Platone, più interessati allo studio delle anime e al mondo delle idee. Oggi si direbbe che erano intellettuali con la puzza sotto il naso, in quanto consideravano disonorevole il lavoro manuale, lasciato al popolino e agli schiavi. Contemporaneo di questi due grandi filosofi fu Democrito di Abdera che ebbe l'intuizione di supporre che la materia fosse composta di minuscole particelle, non divisibili ulteriormente come dice il nome "átomos", che in greco significa indivisibile, precorrendo di 23 secoli le scoperte della fisica moderna. Oggi sappiamo che in realtà anche l'atomo è una particella divisibile, composta di protoni, neutroni ed elettroni, che protoni e neutroni a loro volta sono composti da tre quark ciascuno, e quindi solo all'elettrone e forse ai quark spetterebbe il nome di *átomos*. Ma è importante notare la differenza nel concepire la struttura della materia fra Democrito e i suoi predecessori: Talete pensava che il principio originario dell'universo fosse l'acqua, Eraclito il fuoco, Anassagora la mente, Empedocle i quattro elementi: aria, acqua, terra e fuoco. Democrito invece affermava che tutto ciò che esiste

è formato da combinazioni diverse degli atomi, che gli atomi sono eterni e incorruttibili e il vuoto è necessario al loro movimento. Anche il sole, la luna tutti i corpi celesti sarebbero formati di atomi. Erano intuizioni non dimostrabili, ma quanto vicine alla realtà. Fra l'altro nessuno ha mai visto decadere un protone, per cui si stima che la sua vita media sia molto più lunga – almeno mille miliardi di miliardi di miliardi (o $10^{30}$) di anni – dell'attuale età dell'universo di circa 14 miliardi di anni.

Platone era quello che oggi chiameremmo un superteorico, più interessato a concepire una sua idea di universo perfetto che non alle osservazioni dei moti dei corpi. Per es. scrive che il vero astronomo deve essere un grande saggio, che non si occupa, come Esiodo e altri, del sorgere e del tramontare degli astri, ma studia le sette rivoluzioni nell'ottavo movimento. Ciò che Platone intende è che il compito pratico dell'astronomo consiste nel trovare i veri moti regolari in circoli perfetti nascosti dietro le apparenti irregolarità nel moto dei pianeti. Insomma ha una sua idea di universo perfetto a cui dovrebbe adattarsi l'universo reale.

Tornando a quelli che per Platone erano piuttosto degli artigiani dell'astronomia che dei veri saggi, incontriamo il suo più giovane contemporaneo Eudosso che fu il primo a tentare di dare una spiegazione teorica dei movimenti apparentemente irregolari dei pianeti. Secondo Platone, i corpi celesti erano corpi divini, di natura perfetta, e pertanto dovevano muoversi di moto perfetto, e cioè circolare uniforme. Per ovviare al fatto osservato che i loro moti

invece erano irregolari egli suppose che fossero composti di moti circolari uniformi e che ci fossero più sfere concentriche, tutte ruotanti attorno a un centro comune – la Terra. Ogni pianeta ha la sua propria sfera e ognuna di esse pur avendo il centro nel centro della Terra ha assi diversi, il che spiega le apparenti "imperfezioni" dei loro moti. Il sistema era abbastanza complicato, richiedendo ben 27 sfere, tre per la luna e tre per il sole, quattro per ciascuno dei cinque pianeti e una per le stelle fisse.

Un altro più giovane contemporaneo di Eudosso fu Eraclide Pontico. Egli suggerì che non fosse la sfera delle stelle fisse a ruotare da est a ovest attorno alla Terra, ma bensì la Terra a ruotare da ovest a est attorno al proprio asse, e suppose anche che Venere e Mercurio ruotassero attorno al Sole, mentre gli altri pianeti ruotano attorno alla Terra. Un sistema simile, con due centri, fu proposto molti secoli dopo da Tycho Brahe, il maestro di Keplero, che fece un compromesso fra il sistema copernicano e quello tolemaico, con il Sole e la Luna ruotanti attorno alla Terra e tutti gli altri pianeti orbitanti attorno al Sole.

Aristotele – contemporaneo di Eudosso e di Eraclide – fu allievo di Platone. Mentre per Platone il mondo reale era quello delle idee e i fenomeni visibili erano solo un'ingannevole apparenza, per Aristotele il mondo reale era quello dei fenomeni e quindi sottolinea l'importanza di osservare accuratamente tutti i fenomeni naturali. Per Eudosso le sfere erano figure geometriche senza un vero carattere fisico, mentre per Aristotele sono oggetti materiali, vere e proprie sfere cristalline.

Anche per Aristotele i quattro elementi – terra, acqua, aria e fuoco – costituivano tutti i corpi sulla terra; terra e acqua si muovono naturalmente verso il basso, aria e fuoco verso l'alto. I corpi celesti eterni e divini sarebbero fatti di un quinto elemento – l'etere – più perfetto degli altri quattro. Il regno dell'etere comincerebbe oltre la Luna, mentre nel mondo sublunare si troverebbe un miscuglio dei cinque elementi. Nel regno dell'etere tutti i corpi sono perfetti e immutabili.

Per Aristotele l'universo è finito e sferico. Finito, perché i suoi moti devono essere circolari, e un cerchio di raggio infinito non può esistere. Inoltre uno spazio infinito non ha un centro, mentre l'universo ha un centro – la Terra. L'universo è sferico, perché essendo perfetto deve avere la forma perfetta, quella di una sfera. Una sfera ruotando occupa sempre lo stesso spazio; fuori non c'è né vuoto né spazio. Oggi diremmo: l'universo è tutto ciò che esiste e non ha senso chiederci cosa c'è fuori, perché non c'è nessun fuori.

Queste idee di Aristotele, forse per la sua grande fama di filosofo, resistettero per secoli, ponendo anche un freno allo sviluppo di nuove idee, come quelle avanzate da Aristarco di Samo un secolo dopo.

Aristarco rappresenta un pensatore rivoluzionario, anche se in parte lo aveva preceduto Eraclide. Egli era convinto che fosse il sole al centro dell'universo e che la Terra gli ruotasse intorno. Come fosse arrivato a questa convinzione lo si può dedurre dalla sua opera *Sulla grandezza e distanza del Sole e della Luna*. Basandosi su semplici con-

siderazioni geometriche applicate al triangolo rettangolo avente per vertici il Sole, la Terra e la Luna all'istante del primo quarto, dedusse che il Sole è più di 18 volte e meno di 20 volte più lontano della Luna. Si tratta della prima volta che si cerca di misurare le distanze dei corpi celesti basandosi su le osservazioni. Il principio usato è corretto, anche se il valore che aveva trovato era circa 20 volte più piccolo del valore reale, a causa degli errori troppo grandi fatti nella determinazione dell'istante esatto a cui si verifica il primo quarto. Sempre da considerazioni geometriche stima la distanza della Luna basandosi sulle osservazioni fatte durante le eclissi lunari. E cioè che il raggio della Terra visto dalla Luna è eguale alla somma dell'angolo – osservato – sotto cui dalla Terra si vede il raggio dell'ombra e quello – pure osservato – sotto cui si vede il raggio del Sole. Noto l'angolo sotto cui dalla Luna si vede il raggio terrestre è facile risalire alla distanza della Luna. È possibile che Aristarco fosse a conoscenza delle dimensioni della Terra, determinate dal suo più giovane contemporaneo Eratostene di Cirene. Ma comunque valutò che il rapporto fra il volume del Sole e quello della Terra fosse compreso fra 254 e 368 e molto probabilmente fu l'enorme divario fra Terra e Sole a suggerire ad Aristarco che il centro dell'universo doveva essere proprio il Sole e non la piccola Terra.

Fondamentale nell'interpretazione delle osservazioni, sia di Aristarco che di Eratostene la loro conoscenza della geometria che il loro contemporaneo Euclide aveva sviluppato e che è ancora una delle basi delle nostre conoscenze.

Il metodo usato da Eratostene si basava sulla misura della minima distanza zenitale del Sole misurata dunque al mezzogiorno locale dello stesso giorno dell'anno dalla città di Siene nel sud dell'Egitto e da Alessandria, molto più a nord. L'angolo fra le verticali locali delle due città era 7° 12′ che è anche l'ampiezza in gradi dell'arco di meridiano tra Siene e Alessandria, o usando le parole di Eratostene circa «1/50 del circolo totale» cioè di 360 gradi. Di conseguenza poiché la distanza lineare delle due città era pari a 5000 stadi la circonferenza terrestre doveva essere pari a 250.000 stadi. È incerto il valore di uno stadio; il più probabile è 157 metri, da cui segue un valore per la circonferenza terrestre di 39.250 km, un valore assai prossimo ai moderni valori di 40.074 km (circonferenza equatoriale) e 39.942 km (circonferenza polare).

Dalla differenza fra l'altezza del Sole al solstizio d'estate e al solstizio d'inverno Eratostene determinò anche l'inclinazione dell'equatore sull'eclittica trovando un valore molto vicino al vero di circa 23 gradi e mezzo.

Uno dei più grandi astronomi dell'antichità fu certamente Ipparco di Nicea. Egli capì chiaramente la distinzione fra quello che noi chiamiamo l'anno tropico e l'anno siderale. Il primo misura l'intervallo fra due successivi ritorni del Sole nella stessa posizione all'epoca dello stesso solstizio o dello stesso equinozio. È quello che interessa noi abitanti della Terra poiché è la posizione del Sole nel corso dell'anno che determina l'alternarsi delle stagioni. L'anno siderale misura l'intervallo fra due successivi ritorni del Sole nella stessa posizione fra le stelle ed è più

lungo dell'anno tropico di 0,01417 di giorno. La differenza in lunghezza fra anno tropico e anno siderale fu probabilmente il fatto che fece compiere a Ipparco la sua più importante scoperta: la precessione degli equinozi. Egli si accorse che gli equinozi non sono punti esattamente fissi ma si spostano verso est di 50 secondi d'arco all'anno. Essi vanno, per così dire, incontro al Sole che noi vediamo muoversi sull'eclittica verso ovest.

A Ipparco viene anche attribuita la compilazione di un catalogo delle stelle fisse con la loro posizione in latitudine e longitudine misurate rispetto all'eclittica, contenente 850 stelle.

Al grande astronomo greco è stato dedicato il satellite europeo Hipparcos (acronimo che sta per HIgh Precision PArallax COllecting Satellite) messo in orbita l'8 agosto 1989, che ha fornito dati sulla distanza, i moti propri e lo splendore di 120.000 stelle fino al 15 agosto 1993. Come Ipparco ha rappresentato una pietra miliare nell'astronomia antica, così il satellite Hipparcos è stato un trionfo della scienza e della tecnologia europea nell'era spaziale ed è stato per ora l'unico satellite astronomico dedicato alla misura delle distanze e dei moti delle stelle. È stato anche frutto di una larga partecipazione da parte delle comunità scientifiche e dei governi europei. Per rendersi conto di quanto grande sia stato il progresso nella misura delle distanze stellari ottenute con Hipparcos, basta fare il confronto con il più completo catalogo stellare ottenuto con i classici sistemi di misura da terra: è il catalogo di Yale del 1995, che contiene dati per 8000 stelle e si

basa su osservazioni accumulate nel corso di un secolo, aventi una precisione da 5 a 10 volte minore di quelle di Hipparcos.

Tolomeo, astronomo alessandrino vissuto circa tre secoli dopo Ipparco, si può considerare il suo erede per l'importanza che anch'egli ha avuto nella storia dell'astronomia. Egli riprese il catalogo di Ipparco, aggiungendovi altre 170 stelle, e dette forma matematica al sistema del mondo proposto da Aristotele. Per secoli il sistema tolemaico è stato largamente accettato, fino al 1500 quando Copernico propose il suo sistema eliocentrico.

L'invenzione degli epicicli risale a più di tre secoli prima che Tolomeo la perfezionasse e ne facesse il centro del suo sistema del mondo.

Uno dei maggiori problemi degli astronomi greci era quello di spiegare le irregolarità dei moti dei pianeti. Secondo Aristotele i corpi celesti essendo perfetti per definizione dovevano per forza avere dei moti perfetti e quindi circolari. Eudosso era ricorso alla combinazione di più moti circolari, su sfere concentriche. Eraclide aveva proposto che Mercurio e Venere ruotassero attorno al Sole, mentre il Sole e gli altri pianeti ruotavano attorno alla Terra. Di qui, il fatto che moti irregolari fossero spiegabili con la combinazione di due moti circolari, ebbe per conseguenza che fosse plausibile ammettere che anche i moti degli altri pianeti – Marte, Giove e Saturno – fossero la combinazione di due moti circolari, uno su un circolo più grande avente la Terra al centro, detto deferente e uno su un cerchio più piccolo il cui centro si muove lungo

il deferente, detto epiciclo. Il centro dell'epiciclo è il Sole per Mercurio e Venere e un punto vuoto per gli altri tre pianeti. Questo sistema rappresentava i moti dei pianeti in modo più semplice e accurato delle sfere di Eudosso, e spiegava pure le loro variazioni di splendore come conseguenza della loro variabile distanza dalla Terra.

Tolomeo perfezionò la teoria degli epicicli e determinò anche l'inclinazione del deferente e dell'epiciclo rispetto all'eclittica. Nella forma definitiva data da Tolomeo la teoria degli epicicli era in grado di spiegare soddisfacentemente i moti dei pianeti senza violare il "dogma" di Aristotele sulla necessaria perfezione di movimenti "circolari" di corpi per definizione perfetti. Il sistema geocentrico di Tolomeo è passato alla storia col nome datogli dagli arabi di Almagesto e l'intuizione di Aristarco è rimasta praticamente ignorata per un millennio e mezzo, tanto forte era l'inganno dei sensi che suggeriva l'immobilità della Terra e poi la potenza della religione che poneva l'uomo al centro di un universo creato per lui.

Dopo Tolomeo non ci sono stati grandi progressi ma piuttosto utili riassunti e commenti sulle conoscenze astronomiche che ci hanno fatto conoscere anche dettagli di manoscritti persi.

Il declino o meglio il regresso delle conoscenze astronomiche che ha avuto luogo nei primi secoli dell'era cristiana è testimoniato dalle opere di Isidoro, arcivescovo di Siviglia nel settimo secolo, che fra l'altro scriveva che le stelle ricevono la loro luce dal Sole, che Mercurio descrive la sua orbita in 20 anni e il Sole in 19.

# Scienza araba e astrologia, e declino dell'Europa

Negli anni intorno al 700 d.C. si assiste a un notevole aumento di interesse per l'astronomia nei paesi del vicino e medio oriente, soprattutto perché si pensava che gli astri avessero influenza sulle vicende umane. In particolare i medici erano anche astronomi perché si riteneva che l'astrologia potesse indicare i tempi più adatti per le varie cure. Queste credenze, che avevano scarsamente attecchito nella razionale cultura greca, dilagarono dall'Asia in Europa. Le scarse conoscenze sulla natura e distanza dei corpi celesti giustificavano l'accettazione dell'astrologia. Quello che è veramente assurdo e inspiegabile è che ancora ai giorni nostri sia così diffusa la credulità nell'astrologia, negli oroscopi, nell'influenza degli astri sul nostro carattere e sulle nostre vicende umane. Oggi sappiamo a che distanza da noi sono i pianeti e le stelle, di che cosa sono fatti, quanta radiazione ci inviano, qual è l'intensità dei loro campi magnetici, quale la loro forza di attrazione gravitazionale per rendersi conto di come i loro effetti siano assolutamente trascurabili, eccezion fatta naturalmente per il Sole, la cui radiazione è fonte di luce e calore necessari alla vita e il cui campo gravitazionale tiene in orbita la Terra e tutti gli altri pianeti con i loro satelliti.

Oltre alle credenze astrologiche, l'importanza dell'astronomia nel mondo islamico era dovuta alla neces-

sità di misurare il tempo per stabilire esattamente le ore prescritte per la preghiera, e poiché durante la preghiera si doveva rivolgersi verso la Mecca, in ogni paese si doveva sapere qual era la direzione giusta; bisognava conoscere le fasi lunari per stabilire inizio e fine del ramadan.

Un importante progresso non solo per le scienze ma per tutta la vita pratica e per tutti i secoli a venire fu l'introduzione nel mondo occidentale del sistema di numerazione indiano, che contemplava la presenza dello zero, assente nel sistema di numerazione romano. Ancora oggi si chiamano numeri arabi, ed è facile rendersi conto di quanto più semplice e potente sia questo sistema rispetto a quello dei numeri romani.

La brillante cultura araba, che non aveva portato a grandi progressi, ma il cui maggior merito è stato di aver conservato la cultura dei secoli precedenti, e aver lasciato molte nuove accurate osservazioni, fu spazzata via dalle invasioni barbariche intorno al tredicesimo secolo d.C.

Qualche secolo prima anche l'Europa era divenuta territorio di conquista da parte delle orde barbariche discese dal nord Europa. Le conoscenze greco-romane furono conservate soprattutto nei monasteri. Si conoscevano le costellazioni e il loro sorgere indicava l'ora di inizio di alcune funzioni religiose. La dottrina cristiana stabiliva le regole per fissare la data della Pasqua, che ancora oggi viene stabilita in base a queste, e cioè la prima domenica dopo la prima luna piena di primavera. Quindi se la luna piena cade il 21 marzo ed è sabato, la Pasqua cadrà il 22

marzo; se invece la prima luna piena di primavera cade il 17 aprile ed è lunedì la Pasqua cade il 23 aprile.

Il monaco inglese Beda, detto "Venerabilis" morto nel 735 d.C. aveva calcolato una lista di date di Pasqua. Dai suoi scritti appare che era a conoscenza della sfericità della Terra.

Dopo l'anno 1000 comincia a prevalere di nuovo la cultura greco-romana in un'Europa cristianizzata e nei successivi secoli – '200-'300 – la Chiesa è il potere spirituale dominante.

Le conoscenze astronomiche sono tornate al livello dell'antica Grecia, con la Terra al centro del mondo e stelle e pianeti che le ruotano attorno su sfere cristalline. È così che Dante descrive il suo universo, piazzando l'inferno al centro della Terra.

# Il Rinascimento e la prima età moderna

Dal 600 a.C. al 200 d.C abbiamo avuto lo straordinario sviluppo del pensiero scientifico e filosofico, seguito dal progressivo declino della razionalità per i seguenti tredici secoli. L'eredità scientifica greco-romana è stata raccolta e conservata dal mondo islamico prima e poi da quello cristiano, malgrado i dogmi religiosi abbiano allo stesso tempo ostacolato lo sviluppo della scienza moderna, basata sull'osservazione e l'esperimento e non su preconcette dottrine filosofiche.

Una nuova concentrazione di persone, idee e sviluppo scientifico, che prelude al pensiero scientifico moderno la incontriamo nel Rinascimento.

I pilastri della nuova scienza astronomica sono Copernico (1473-1543), Tycho Brahe (1546-1601), Keplero (1573-1630), Galileo (1564-1642), Newton (1642-1727).

Niccolò Copernico nacque a Torun nel 1473. Era destinato alla carriera ecclesiastica, ma i suoi maggiori interessi erano la matematica e l'astronomia. Ha vissuto e studiato per una diecina di anni in Italia, all'Università di Bologna, dove studiò legge, poi di Padova dove studiò teologia e di Ferrara, dove completò gli studi teologici oltre a continuare sempre gli studi di matematica e astronomia.

Copernico oggi sarebbe definito un teorico, in quanto non era particolarmente interessato a fare egli stesso osser-

vazioni, ma preferiva usare quelle degli altri. Comunque si rendeva conto che il numero crescente di dati osservativi non poteva essere soddisfacentemente spiegato dal sistema tolemaico. Infatti questo diventava sempre più farraginoso e complicato, richiedendo l'introduzione di ancora altri epicicli per spiegare i moti osservati. Nonostante queste complicazioni del sistema tolemaico, il sistema eliocentrico proposto da Aristarco, e di cui certamente Copernico era a conoscenza, ebbe grandi difficoltà ad affermarsi perché andava contro all'autorità di Aristotele e della Bibbia. Si notava per esempio che Giosuè intimò al Sole e non alla Terra di fermarsi, quindi era il Sole e non la Terra a muoversi. Inoltre si riteneva assurda l'idea che la Terra potesse ruotare su se stessa e ruotare intorno al Sole senza che non ci si accorgesse affatto di tali moti. Fra l'altro un'obiezione frequente al moto di rotazione era la seguente: se facciamo un salto, intanto la Terra ci gira sotto e dovremmo ricadere in posizione diversa da quella da cui siamo partiti. L'assurdità di questa obiezione fu poi dimostrata chiaramente da Galileo con il famoso esempio della nave in moto uniforme. Nel *Dialogo dei massimi sistemi* Galileo mette in bocca a Salviati (che è poi lo stesso Galileo) gli argomenti di Aristotele:

> dice dunque Aristotile, argomento certissimo dell'immobilità della Terra esser il veder noi i proietti in alto a perpendicolo ritornar per l'istessa linea nel medesimo luogo di dove furon tirati. E questo, quando bene il movimento fosse altissimo; il che non potrebbe accadere quando la Terra si movesse, perché nel tempo che 'l proietto si

> muove in su e 'n giù, separato dalla Terra, il luogo ove ebbe principio il moto del proietto scorrerebbe, mercé del rivolgimento della Terra. per lungo tratto verso Levante, e per tanto spazio nel cadere, il proietto percuoterebbe in Terra lontano dal detto luogo.

Questo dunque uno degli argomenti contro il moto della Terra riportato da Salviati, il quale poi porta un argomento a favore, gli esperimenti nella stiva di una nave:

> [...] Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di un gran naviglio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando della acqua in un altro vaso di angusta bocca, che stia posto a basso: e standо ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazi passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; che (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma; voi saltando passerete nel tavolato i

> medesimi spazi che prima; né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto.

Copernico nel 1530 espose il suo sistema del mondo nel *Commentariolus*, un riassunto divulgativo di quello che espose poi nel *De revolutionibus orbium coelestium* che non osò pubblicare subito, temendo gli attacchi che sarebbero venuti per la sua presunzione di contraddire gli insegnamenti della Bibbia. Il testo completo fu pubblicato solo nel 1543, anno della morte di Copernico. Martin Lutero in un suo scritto del 1539 esclamava: «Questo pazzo stravolgerà l'intera Arte Astronomica...».

Il nuovo sistema semplificava la spiegazione dei moti dei pianeti, anche se pure Copernico fu obbligato a introdurre gli epicicli per spiegare le irregolarità nel moto dei pianeti, dovute al fatto che anch'egli non mise mai in dubbio il pregiudizio aristotelico sulle perfette orbite circolari, pregiudizio che cadde finalmente in seguito alle osservazioni di Tycho Brahe interpretate dal suo allievo Keplero. Quest'ultimo ha avuto il grande merito di credere alle osservazioni, che indicavano che le orbite non erano circolari ma ellittiche, piuttosto che all'autorità di Aristotele.

La novità del sistema copernicano era troppo rivoluzionaria per l'epoca perché potesse essere largamente accettata. Fra i pochi sostenitori, oltre a Galileo e a Keplero, va ricordato Giordano Bruno (1548-1600), frate do-

menicano che aveva dell'universo un'idea estremamente moderna. Pensava ad un universo infinito popolato da un infinito numero di stelle. Egli era convinto che le stelle fossero tanti soli, e come il Sole circondate da pianeti, e questi pianeti abitati come la Terra. Per queste sue idee eretiche e avendo coraggiosamente rifiutato di abiurare fu mandato al rogo il 17 febbraio 1600 in Campo dei Fiori a Roma.

Oggi sappiamo che molte, forse tutte le stelle hanno dei sistemi planetari; non sappiamo se e quanti di questi ospitino forme di vita, ma ritenere che fra miliardi di miliardi di pianeti ci sia solo la Terra adatta ad ospitare la vita, e una vita intelligente, significherebbe ritenere la Terra al centro dell'universo, che un dio onnipotente avrebbe creato apposta per noi.

Un eccellente osservatore, forse il migliore dell'era pretelescopica, fu il danese Tycho Brahe, noto in Italia come Ticone. Egli non accettò mai il sistema copernicano ma immaginò un sistema con due centri, come già aveva suggerito Eraclide Pontico. Ticone riteneva che Sole e Luna orbitassero attorno alla Terra, che era immobile al centro, mentre tutti gli altri pianeti orbitavano attorno al Sole. Fra i maggiori meriti di Ticone vanno ricordate le sue osservazioni delle comete. Le loro orbite fortemente ellittiche intersecavano quelle dei pianeti rendendo inaccettabile l'idea aristotelica delle sfere solide. Un'altra importante serie di osservazioni fu quella di una stella molto splendente, quasi come Venere, apparsa nella costellazione di Cassiopea fra il 3 e il 6 novembre 1572. La

osservò per molti mesi fino a che divenne troppo debole nel marzo 1574. Da queste osservazioni è evidente che doveva trattarsi di una supernova, passata alla storia come la supernova di Tycho Brahe. La precisione delle sue osservazioni ha permesso di trovare in quella posizione una debole nebulosa emittente sia onde radio che raggi X, ma nessuna traccia del residuo stellare.

Nel 1604 apparve un'altra supernova nella costellazione di Ofiuco, scoperta e osservata accuratamente da Keplero e passata alla storia come la supernova di Keplero. Questi due eventi persuasero definitivamente Galileo che l'idea di Aristotele sulla immutabilità dei corpi celesti più lontani della Luna era inaccettabile.

Keplero fu allievo di Ticone e contemporaneo di Galileo. Ambedue erano entusiasti sostenitori del nuovo sistema ed è interessante lo scambio di lettere fra di loro. Nel 1597 Galileo scriveva a Keplero:

> Molti anni fa io cominciai a essere d'accordo con Copernico [...]. Esposi molte ragioni e argomenti [a favore] e anche rifiuto di argomenti contrari, che però non mi azzardai fino ad ora a divulgare, dissuaso dal destino dello stesso Copernico, nostro maestro, che pure avendo ottenuto fama immortale presso alcuni, a innumerevoli altri appare [...] oggetto di derisione e ingiurie. Certo, io pubblicherei il mio punto di vista, se ci fossero molte più persone come voi; ma poiché così non è, mi asterrò.

E Keplero risponde:

> Mostrate le vostre prove; riunendo le nostre forze e le vostre prove potrete aiutare i vostri sostenitori che ora soffrono per giudizi ingiusti. Abbi fiducia Galileo e vai avanti! Se io ho ragione, solo pochi dei maggiori matematici europei si terranno alla larga da noi; tale è il potere della verità.

Keplero, utilizzando le accurate osservazioni del suo maestro Ticone sulla posizione dei pianeti trovò che le loro orbite non sono dei circoli perfetti come voleva Aristotele, ma delle ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi. È questa la prima famosa legge di Keplero che impariamo a scuola. La grandezza di Keplero sta nell'avere accettato i risultati delle osservazioni, superando pregiudizi dettati da astratte concezioni del mondo. Egli si accorse anche che la velocità orbitale dei pianeti è maggiore quando si trovano alla minima distanza dal Sole (al perielio) e minima quando si trovano alla massima distanza (all'afelio). Segue di qui la seconda legge: il segmento di retta immaginario che congiunge il pianeta al Sole (cioè il raggio vettore) spazza aree eguali in tempi eguali.

Keplero cercò anche se esistessero connessioni fra i moti dei vari pianeti e dopo nove anni dall'enunciazione delle prime due leggi, avvenuta nel 1609, riuscì a stabilire la terza legge: il rapporto fra i quadrati dei periodi di rivoluzione e il cubo dei semiassi maggiori è lo stesso per tutti i pianeti. Queste tre leggi rendevano conto con grande precisione e semplicità dei moti dei pianeti e delle loro apparenti irregolarità che avevano costretto gli antichi a inventare epicicli su epicicli.

Erano dati empirici, forniti dalle osservazioni. Per scoprirne la causa occorre aspettare Isacco Newton.

Intanto sta per arrivare una vera rivoluzione per le osservazioni astronomiche. È il 1608 e in Europa si cominciano a diffondere i primi cannocchiali, inventati da qualche ignoto ottico tedesco o olandese. Galileo ne viene a conoscenza e se ne costruisce uno e nel 1609 lo offre ai governanti di Venezia, come un oggetto che fa vedere vicine le cose lontane e pertanto permetterebbe di avvistare le navi nemiche con grande anticipo.

Ma la grande intuizione di Galileo consiste nell'utilizzarlo per guardare il cielo. E fa subito tutta una serie di straordinarie e inaspettate scoperte che descrive nel *Sidereus nuncius* e che sono riassunte nel titolo: Annuncio astronomico che contiene e chiarisce osservazioni fatte di recente per mezzo di un cannocchiale sulla faccia della Luna, nella Via Lattea e nelle stelle nebulose, in molte fisse nonché in quattro pianeti chiamati astri medicei mai visti finora.

Egli descrive dettagliatamente come si è costruito il primo cannocchiale, ottenendo un ingrandimento 3, poi un secondo con ingrandimento 60 e infine uno con ingrandimento 1000. Osserva la faccia della Luna che «non è liscia, uniforme ed esattamente sferica, opinione, invece diffusa presso molti studiosi riguardo alla Luna e a tutti gli altri corpi celesti, ma, al contrario, irregolare, ricca di asperità, piena di cavità e sporgenze, non diversamente dalla faccia della Terra stessa, qua dai gioghi dei monti, là dalla profondità delle valli». Cade ormai il mito ari-

stotelico della diversa natura dei corpi celesti. Quale più bella prova che la somiglianza fra terreno terrestre e quello lunare!

Il cannocchiale svela a Galileo l'essenza della Via Lattea:

> [...] tutte le diatribe che per tanti secoli hanno tormentato gli studiosi vengono meno grazie alla certezza visiva e saremo così liberati da dispute verbose. La Galassia non è infatti altro che una congerie di innumerevoli stelle riunite insieme [...]. Inoltre (il che è ancor più mirabile) le stelle chiamate fino ad oggi da tutti gli astronomi Nebulose, sono insiemi di stelle riunite in modo mirabile; dall'unione dei raggi di queste [...] deriva quel candore che è stato ritenuto fino a oggi la parte più densa del cielo, capace di distorcere i raggi delle stelle o del Sole. [...] Nel primo disegno abbiamo la nebulosa chiamata testa di Orione, nella quale abbiamo contato 21 stelle. Il secondo disegno raffigura la nebulosa chiamata Presepe, che non è solo una stella, ma un insieme di più di quaranta stelline.

Il Presepe è noto oggi come un esempio di ammasso aperto, o famiglia di stelle tutte originatesi nella stessa nube interstellare, e aventi quindi circa la stessa età e la stessa composizione chimica, e descriventi tutte circa la stessa orbita attorno al centro della Galassia.

Infine Galileo riporta il diario delle osservazioni di Giove compiute fra il 7 gennaio 1610 e il 2 marzo dello stesso anno e della sua maggiore scoperta: la presenza di quattro piccole stelline vicino al pianeta, e la cui posizione relativa cambiava da una notte all'altra. Galileo capisce

che non sono stelle, ma pianeti orbitanti attorno a Giove: satelliti di Giove. Galileo li chiama astri medicei in onore della famiglia Medici e in particolare Cosimo II de' Medici, a cui è dedicato il *Sidereus nuncius*.

Galileo sottolinea l'importanza di questa scoperta:

> per togliere ogni dubbio a quelli che accettano tranquillamente, nel sistema copernicano, la rivoluzione dei pianeti intorno al Sole, che però sono turbati dal moto della sola Luna intorno alla Terra, mentre ambedue orbitano intorno al Sole in un anno, da ritenere che questa configurazione dell'universo debba essere respinta, in quanto impossibile; ora infatti non abbiamo più un solo pianeta che ruota intorno ad un altro, mentre ambedue compiono una grande orbita intorno al Sole, ma invero l'esperienza visibile mostra quattro stelle che ruotano intorno a Giove, come la Luna intorno alla Terra, mentre tutti, insieme con Giove, compiono in 12 anni una grande orbita attorno al Sole.

Quindi la scoperta dei satelliti di Giove travalica l'importanza di avere visto corpi di cui fino ad allora si ignorava l'esistenza, perché essi costituiscono una prova a favore del sistema copernicano, formando essi stessi con Giove un sistema solare in miniatura.

Fra le altre scoperte rese possibili dall'uso del cannocchiale va ricordata quella delle macchie solari, altra sconfessione della teoria aristotelica sulla immutabilità e perfezione dei corpi celesti. In realtà alcune grosse macchie solari erano già state viste ad occhio nudo ma si riteneva si trattasse di qualche corpo frapposto fra il Sole e noi o di

piccoli corpi scuri ruotanti attorno al Sole. Dall'osservazione delle macchie Galileo deriva il periodo di rotazione del Sole e dal fatto che il loro cammino apparente sul disco solare non è rettilineo ma curvo capisce che l'equatore solare è inclinato rispetto al piano dell'eclittica.

Tutte queste scoperte che contraddicevano sia la filosofia aristotelica sia la Santa Bibbia non persuasero i teologi romani:

> Che il Sole sia immobile al centro del mondo è ridicolo, filosoficamente assurdo e chiaramente eretico; e che la Terra non sia il centro del mondo e non sia immobile ma si muova rispetto a sé stessa in moto giornaliero è pure filosoficamente assurdo e teologicamente è per lo meno un errore di fede.

Galileo fu convocato dal Cardinale Bellarmino. Fu informato che la dottrina sul moto della Terra non doveva essere insegnata né considerata vera, ma poteva essere solo considerata un'ipotesi matematica, e fu ammonito e invitato ad abbandonarla. Galileo, che evidentemente non se la sentiva di far la fine di Giordano Bruno, si sottomise e i libri di Copernico e tutti quelli che sostenevano il suo sistema furono proibiti e messi all'Indice. Fu solo dopo il 1835 che le opere di Copernico, Keplero e Galileo furono tolte dall'elenco dei libri proibiti, e solo verso la fine del XX secolo la Chiesa ha riconosciuto il suo errore nei riguardi di Galileo. Ma non ha perso il vizio di interferire sulla ricerca scientifica, quando sotto le sue pressioni e ingerenze, politici ignoranti hanno varato un'abominevole legge (la

legge 40) a proposito della procreazione assistita, in cui si imponevano limiti e veti assurdi sull'utilizzo delle cellule staminali embrionali, perché gli embrioni avrebbero già l'anima. E pensare che nessuno di noi sa precisamente che cosa sia quest'anima, non solo degli embrioni, ma di tutti noi viventi, uomini e animali.

Galileo, amareggiato e quasi cieco, finiva i suoi giorni agli arresti domiciliari nella villa Il Gioiello, sulla collina di Arcetri, a sud di Firenze, nel 1642. Proprio in quell'anno, quasi a dargli il cambio, in Inghilterra nasceva Isaac Newton.

Sebbene Newton sia noto soprattutto per la sua legge di gravitazione, va ricordato anche per il suo metodo scientifico moderno, secondo cui ogni teoria va verificata con gli esperimenti o con le osservazioni. Inoltre ha inventato il calcolo infinitesimale ed ha dato importanti contributi all'ottica sia progettando un telescopio composto soltanto da uno specchio concavo e da uno specchietto piano, che a differenza del cannocchiale di Galileo, composto da una lente piano convessa e una piano concava, non era affetto da aberrazione cromatica e dava quindi immagini molto più nitide.

Aveva poi studiato la scomposizione della luce bianca nelle sue componenti monocromatiche attraverso un prisma di vetro e ottenuto il primo spettro di un corpo celeste: quello di Venere.

Il grande merito di Newton fu quello di aver capito che la forza che fa cadere i corpi a terra è la stessa che tiene la Luna in orbita attorno alla Terra e i pianeti in

orbita attorno al Sole, ed è anche la stessa che spiega le maree.

La leggenda racconta che Newton ebbe questo lampo di genio quando gli capitò di vedere una mela cadere dall'albero.

Nella sua opera *Philosophiae naturalis principia matemathica* (1686) scrive:

> Dall'analisi del moto dei proiettili è facile capire che, mediante l'ausilio di opportune forze centripete, i pianeti possono essere tenuti in moto su orbite circolari: se si scaglia un sasso, questo, per l'azione del suo stesso peso, è condotto fuori dalla traiettoria rettilinea che esso seguirebbe per la spinta iniziale e descrive una traiettoria curvilinea in aria, prima di cadere al suolo, e, quanto maggiore è la velocità di lancio, tanto maggiore sarà il tratto percorso prima di raggiungere il suolo. Perciò, se supponiamo di poter aumentare la sua velocità in modo che esso descriva un arco di 1, 2, 5, 10, 100, 1000 miglia prima di cadere sulla Terra, finché, superando i limiti della Terra, uscirebbe nello spazio, senza toccarla, [consideriamo] le traiettorie curvilinee descritte da un corpo lanciato in direzione orizzontale dalla vetta di una montagna con velocità sempre maggiore. Ora poiché i moti celesti sono poco o punto influenzati dalla resistenza dello spazio in cui si muovono,supponiamo che non ci sia aria intorno alla Terra, o che, per lo meno, essa offra una debolissima resistenza. [...]
> Aumentando la velocità il sasso cadrà sempre più lontano, fino a descrivere un'intera circonferenza attorno alla Terra e ricadere sulla montagna da cui era stato lanciato [...]. Ma se ora immaginiamo di lanciare dei corpi paral-

lelamente all'orizzonte da altezze ancora maggiori, 5, 10, 100, 1000 o più miglia o anche pari a molti raggi terrestri, questi corpi a seconda delle loro diverse velocità e della diversa forza di gravità a differenti altezze, descriveranno archi sia concentrici con la Terra o con varie eccentricità e seguiteranno a girare nei cieli in quelle orbite come fanno i pianeti nelle loro orbite.

Newton aveva dunque già immaginato la possibilità di realizzare i satelliti artificiali. Ma come arrivò a stabilire come la forza di gravità dipendesse alla distanza dal centro della Terra?

Confrontando l'accelerazione di gravità di un corpo – un sasso o la famosa mela – in caduta sulla superficie della Terra, con il moto della Luna, che può essere considerato una caduta senza fine.

L'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre è 981 cm al secondo per ogni secondo. Lo stesso dato per la Luna è 0,27 cm al secondo per ogni secondo. Newton osserva che il rapporto 981/0.27 è esattamente eguale al rapporto fra la distanza media Terra-Luna e il raggio medio terrestre elevato al quadrato – $(384.000/6368)^2$ – da cui Newton dedusse che la forza di gravità della Terra è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal centro della Terra. Generalizzando questo dato Newton formula la legge universale della gravitazione: Tutti i corpi si attraggono l'un l'altro con una forza direttamente proporzionale alle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato delle distanze fra di essi. Applicando questa legge al moto dei pianeti attorno al Sole Newton ritrova

come conseguenza matematica le tre leggi di Keplero, che quest'ultimo aveva ricavato empiricamente grazie alle osservazioni delle posizioni dei pianeti a varie epoche. È ben noto che la legge di gravitazione spiega anche il fenomeno delle maree, causato dall'attrazione della Luna e in misura minore del Sole, tanto più lontano. L'emisfero rivolto verso la Luna subirà un'attrazione gravitazionale maggiore ed è facile capire il sollevamento dell'oceano. Ma anche dalla parte diametralmente opposta si osserva un analogo sollevamento. Questo è dovuto al fatto che l'attrazione lunare sull'emisfero più lontano è minore di quella che la Luna esercita sul centro della Terra e di conseguenza la massa oceanica è meno legata alla superficie terrestre. La rotazione della Terra fa sì che l'attrazione lunare e solare sulle varie parti del globo cambi continuamente e gli oceani liberi di muoversi ridistribuiscono la loro massa a formare due rigonfiamenti permanenti diametralmente opposti. Non tutti sanno che anche la crosta solida va soggetta alle maree, che però nel caso della Terra ammontano a pochi centimetri e quindi passano del tutto inosservate.

Che la legge di gravitazione sia una legge universale è stato confermato dalle moderne osservazioni di stelle doppie e dai moti delle stelle nella nostra e nelle altre galassie.

Il fatto che l'attrazione gravitazionale agisse istantaneamente a distanza lasciava Newton molto perplesso. Era qualcosa di magico e misterioso, ancora oggi non facilmente comprensibile. Newton in una lettera scrive:

> È inconcepibile che la materia bruta e inanimata, possa, senza la mediazione di qualcos'altro, che non è materiale, operare e influenzare altra materia, senza mutuo contatto. [...] Che la gravità sia innata, inerente e essenziale alla materia, cosicché un corpo possa agire su un altro a distanza, attraverso il vuoto, senza la mediazione di qualcos'altro, da cui e tramite cui la loro azione e forza possa essere trasportata dall'uno all'altro, è secondo me un'assurdità così grande, che nessuna persona che abbia capacità di pensare su argomenti filosofici, accetterebbe mai.

Nella seconda edizione dei *Principia* (1713) scrive:

> Finora ho spiegato i fenomeni dei cieli e del nostro mare con la potenza della gravità, ma non ho spiegato la causa di questo potere [...] finora non sono stato capace di scoprire la causa di queste proprietà della gravità dai fenomeni, e non faccio ipotesi; e le ipotesi, siano esse metafisiche o fisiche, di qualità occulta o meccanica, non hanno posto nella filosofia sperimentale [...] e a noi basta che la gravità esista e agisca secondo le leggi che ho spiegato, e renda pienamente conto di tutti i moti dei corpi celesti e del nostro mare.

Va sottolineata la modernità del pensiero di Newton, che è fondamentale nella ricerca scientifica. Lo scienziato osserva i fenomeni, fa esperimenti e da questi cerca di trarre una legge generale che li rappresenti. Perché ci sono queste leggi e non altre e chi o cosa le ha imposte – se un dio o la natura o cos'altro non è compito dello scienziato.

Alle perplessità di Newton e dei suoi successori sull'azione istantanea a distanza ha dato una risposta due

secoli dopo Albert Einstein con una interpretazione rivoluzionaria della forza di gravità. La stessa presenza di una massa nello spazio modificherebbe la curvatura dello spazio stesso. La massa del Sole creerebbe una specie di imbuto attorno ad esso che costringerebbe i pianeti a descrivere le loro traiettorie ellittiche attorno al Sole. Solo a grande distanza da ogni corpo materiale lo spazio sarebbe piano. Quindi invece di una vera e propria forza la gravità sarebbe solo la conseguenza di una deformazione geometrica dello spazio dovuta alla presenza di corpi, così come un telo di gomma viene deformato da una palla di ferro gettata su di esso.

A Newton va anche il merito di aver capito che le comete fanno parte del sistema solare, e al suo estimatore e contemporaneo Edmund Halley (1656-1742) di aver trovato la più bella riprova sperimentale. Egli calcolò le orbite di 24 comete e trovò che quelle osservate nel 1456, nel 1531, nel 1607 e nel 1682 descrivevano tutte la stessa orbita ed erano dunque lo stesso oggetto, una cometa periodica con un periodo di circa 76 anni e previde anche il successivo passaggio nel 1758, previsione verificata, ma che purtroppo Halley, morto 16 anni prima, non ebbe la soddisfazione di osservare. Da varie fonti storiche,in gran parte cinesi sono riportati i passaggi di questa cometa nel 241, 164, 87 e 12 a.C. e poi nell'era cristiana nel 66, 141, 218, 295, 374, 451, 530, 607, 684, 760, 837, 912, 989, 1066, 1145, 1222, 1301, 1378, 1456, 1531, 1607, 1682, 1759, 1835, 1910, 1986. Il passaggio del 1986 fu studiato da varie sonde, fra cui la sonda europea Giotto che

ha inviato immagini del nucleo della cometa ottenute da una distanza di appena 500 km ed ha fornito i maggiori risultati sulla sua composizione chimica. La sonda deve il suo nome al fatto che la cometa è raffigurata nel dipinto di Giotto (circa 1270-1337) che si trova a Padova nella Cappella degli Scrovegni. Giotto avrebbe osservato il passaggio del 1301; allora non c'era l'inquinamento luminoso e i fenomeni celesti erano sotto gli occhi di tutti; non come nel 1986 quando osservarla ad occhio nudo dalle strade cittadine era praticamente impossibile.

Scienziati importanti, la cui fama è in parte oscurata dalla grandezza predominante di Newton furono i suoi contemporanei Gian Domenico Cassini (1625-1712) e Christian Huygens famosi fra l'altro per i loro studi su Saturno, i suoi satelliti e gli anelli. Ad essi è stata dedicata la missione spaziale verso Saturno, partita il 15 ottobre 1997 ed entrata in orbita attorno a Saturno il 4 luglio 2004. La sonda Cassini della NASA portava a bordo la sonda Huygens dell'ESA e questa si sganciava dalla "madre" il 25 dicembre 2004 e proseguiva da sola verso il più grande satellite di Saturno, Titano, nella cui atmosfera scendeva il 14 gennaio 2005. Le immagini di Titano inviate a terra erano straordinariamente simili a quelle di una campagna terrestre, con colline, laghi e fiumi, che alla temperatura di Titano non potevano essere di acqua ma di metano liquido.

Allo scienziato danese Ole Roemer (1644-1710) dobbiamo la prima misura della velocità della luce. Misurando l'epoca dell'eclisse dei satelliti di Giove da parte del

pianeta, quando questo era all'opposizione con quella di quando Giove era quasi in congiunzione, si trovava una differenza di circa 10 minuti, che Roemer attribuì al fatto che la velocità della luce è finita e impiega più tempo a raggiungerci quando Giove è alla massima di quando è alla minima distanza da noi. Il valore trovato – 225.000 km/sec – era affetto dall'errato valore, allora accettato, della distanza Terra-Sole. Introducendo il valore corretto per la distanza Terra-Sole la velocità della luce risultava pari a 298.000 km/sec, un valore assai prossimo a quello misurato oggi di 299.792 km/sec.

James Bradley (1693-1762) è noto per avere osservato che la stella Gamma Draconis sembrava descrivere nel corso dell'anno sulla volta celeste una ellisse il cui centro coincideva col polo dell'eclittica e il cui asse maggiore aveva un'ampiezza di circa 41 secondi d'arco. Infatti tutte le stelle nel corso di un anno sembrano descrivere delle piccole ellissi il cui centro coincide col polo dell'eclittica e la spiegazione classica consiste nel fatto che la velocità della luce si combina con la velocità di rivoluzione della Terra nella sua orbita. Di conseguenza noi vediamo la stella spostata nella direzione in cui si muove la Terra. Oggi sappiamo che la velocità della luce nel vuoto è la massima possibile e questo combinarsi della velocità della luce con la velocità orbitale della Terra va inteso nel senso che, restando invariata la velocità di propagazione della luce proveniente dalla stella, è la direzione di provenienza che appare spostata verso la direzione di moto della Terra di un angolo che espresso in radianti è dato dal rapporto

fra la velocità orbitale della Terra $v$ e la velocità della luce $c$. Poiché $v/c$ = 30/300.000 = 0,0001 e poiché in un radiante sono contenuti 206265 secondi d'arco il semiasse maggiore dell'ellisse è dato da 20,6 secondi d'arco. Bradley capì qual era la causa di questo annuale spostamento apparente delle stelle sulla volta celeste e lo utilizzò per derivare il valore della velocità della luce con un metodo completamente diverso da quello impiegato da Roemer. Trovò un valore di 308.300 km/sec abbastanza vicino al più preciso valore accettato oggi di 299.792 km/sec. Il fenomeno scoperto da Bradley è noto come aberrazione della luce. Ma c'è un altro effetto che può dar luogo all'apparente spostamento di una stella sulla volta celeste: è la parallasse annua. Poiché la Terra orbitando attorno al Sole, cambia il suo punto di vista, dovrebbe vedere le stelle in posizione leggermente diversa nel corso dell'anno. Lo stesso effetto di parallasse lo proviamo quando osserviamo un oggetto vicino rispetto ad uno sfondo lontano, cambiando il nostro punto di vista. Per es. guardiamo un albero a pochi metri da noi, chiudendo alternativamente l'occhio destro e il sinistro. L'albero sembrerà oscillare verso sinistra e verso destra rispetto a una casa lontana una ventina di metri, perché cambia di pochi centimetri (la distanza interpupillare) il nostro punto di osservazione. Già gli oppositori del sistema copernicano avevano preso come prova dell'immobilità della Terra la mancanza di ogni effetto di parallasse, mentre i sostenitori l'attribuivano alla grande distanza delle stelle, per cui sarebbe stata troppo piccola per poterla notare. In realtà anche la stella

più vicina, Proxima Centauri ha una parallasse inferiore al secondo d'arco: 0,7″ e bisogna arrivare al 1838 perché l'astronomo tedesco Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) riuscisse a misurare la parallasse della stella 61 Cygni, che trovò pari a 0,31″. Il più preciso valore moderno è un po' più piccolo, 0,29″. L'inverso della parallasse è la distanza misurata in parsec. Un parsec è la distanza da cui si vedrebbe il semiasse dell'orbita terrestre sotto l'angolo di un secondo d'arco, ed è pari a 3,26 anni luce.

Immanuel Kant (1724-1804) si occupò anche di cosmologia e nel suo saggio su *La Storia generale della natura e teoria del cielo* dalle osservazioni che tutti i pianeti orbitano praticamente su uno stesso piano e nello stesso senso, suggerì che il sistema solare si sia formato da una nube di materia interstellare, che ruotando si sarebbe appiattita a formare un disco. La sua idea fu poi ripresa da Laplace (1749-1827) che la sviluppò quantitativamente. Oggi abbiamo prove osservative che le giovani stelle sono circondate da un disco molto più esteso della stella, in cui si formerebbero delle concentrazioni di materia che darebbero origine ai pianeti e ai loro satelliti.

A cavallo fra il XVIII e il XIX secolo si scoprono nuovi membri del sistema solare e per la prima volta l'indagine scientifica si estende ben oltre i suoi confini. A questo proposito vanno ricordati due nomi: gli Herschel e Giuseppe Piazzi.

William Herschel (1738-1822) e la sorella Caroline (1750-1848) e il figlio di William, John (1782-1871) erano astronomi inglesi di origine tedesca. William è stato di

gran lunga il più importante e a lui si deve la scoperta di Urano e le prime indagini quantitative sulla Via Lattea; Caroline l'assisteva nelle osservazioni e aveva anch'essa scoperto nuove comete. John aveva catalogato le nebulose e gli ammassi stellari del cielo australe e scritto un libro di divulgazione astronomica.

William si era proposto di misurare le parallassi di alcune stelle. Nel 1781 scrive:

> Martedì 13 marzo fra le 10 e le 11 di sera, mentre stavo esaminando le deboli stelle nelle vicinanze di eta Geminorum, ne scorsi una che appariva chiaramente più grande delle altre [...] sospettai si trattasse di una cometa.

Seguitò le osservazioni; questa strana cometa non aveva coda e mostrava un disco ben definito. Dopo parecchi mesi di osservazioni fu possibile calcolarne l'orbita. Fu trovata un'orbita circolare il cui raggio era 19 volte più grande di quello dell'orbita terrestre. Dunque era un pianeta orbitante ben al di là dell'orbita di Saturno.

Con la sua scoperta William Herschel aveva più che raddoppiato il diametro del sistema solare. Egli si dedicò anche all'osservazione di numerose stelle doppie ottenendo la prova dell'universalità della legge di gravitazione: essa spiega i moti delle stelle così come spiega i moti dei pianeti. Col telescopio riflettore che si era costruito da sé, aveva scoperto nebulose e ammassi di stelle e pubblicato nel 1786 un *Catalogo* di mille nuove nebulose e ammassi di stelle, nel 1789 ne pubblicò un altro con più di mille oggetti e nel 1802 un terzo catalogo con altri cinquecento oggetti.

Ci si domandava quanto fosse grande l'universo, quale fosse la sua struttura; già Galileo col suo cannocchiale aveva capito che la Via Lattea che come un arco traversa il cielo deve essere dovuta ad un addensamento di miriadi di stelle e Kant pensava fosse la proiezione di un gigantesco sistema di stelle. Ci potevano essere molti altri sistemi simili alla Via Lattea; ma tutti questi argomenti erano puramente speculativi. Le risposte arrivarono solo nei primi decenni del XX secolo, ma Herschel fu il primo a tentare di stabilire dimensioni e forma della Via Lattea basandosi sulle osservazioni.

Herschel coi suoi telescopi costituiti da specchi concavi di circa 30 cm e 48 cm di diametro e focali da 2 metri fino a 6 metri riusciva a vedere nettamente la fascia biancastra della Via Lattea risolta in migliaia di deboli stelle. Ammettendo che tutte le stelle siano egualmente luminose e distribuite uniformemente nello spazio, si poteva stimare il numero di stelle e l'estensione del sistema di stelle nelle varie direzioni. Benché queste ipotesi siano approssimazioni molto grossolane alla realtà, Herschel stabilì che la Via Lattea era un disco esteso sul piano della Via Lattea almeno 5 volte più che in direzione perpendicolare ad esso e che la sua estensione nel piano del disco era circa 800 volte la distanza media fra stella e stella, che Herschel stimava pari alla distanza (sconosciuta) di Sirio o di Arturo dal Sole. Posto, con le conoscenze attuali, questa distanza di una ventina di anni luce, il diametro della Via Lattea sarebbe di 16.000 anni luce, quasi un ordine di grandezza più piccolo del valore moderno.

Oltre a questo risultato Herschel intuì che probabilmente le nebulose che osservava col suo telescopio erano grandi famiglie di stelle come la Via Lattea, e cominciò a chiedersi come si fossero formate ed evolute. Il concetto di evoluzione attraverso un lungo processo fu accettato con entusiasmo da alcuni, ma non dalla maggioranza, perché contrastava con il racconto biblico sulla creazione.

Il XIX secolo inizia con un'importante scoperta astronomica da parte di Giuseppe Piazzi, nato a Ponte di Valtellina, che dopo avere insegnato filosofia e matematica a Genova, a Malta e a Ravenna, fu invitato a Palermo dall'Accademia dei regi studi e lì poté dedicarsi ai suoi interessi astronomici e potenziare gli strumenti di quell'osservatorio. Piazzi descrive le osservazioni che lo hanno reso famoso, la scoperta del primo pianetino:

> Risultati delle osservazioni della nuova stella scoperta il dì primo gennaio all'Osservatorio Reale di Palermo – Palermo 1801.
> Già da nove anni travagliando io a verificare le posizioni delle stelle che si trovano raccolte ne' vari Cataloghi degli astronomi, la sera del primo gennaio dell'anno corrente, tra molte altre cercai la 87a del Catalogo delle stelle zodiacali dell'Abate La Caille. Vidi che era essa preceduta da un'altra, che secondo il costume, volli osservare ancora [...]. La sera del due replicai le mie osservazioni, ed avendo ritrovato,che non corrispondeva né il tempo, né la distanza dallo zenit, dubitai sulle prime di qualche errore nell'osservazione precedente; concepii in seguito un leggiero sospetto, che forse esser potesse un nuovo astro.

> La sera del tre il mio sospetto divenne certezza, essendomi assicurato che essa non era stella fissa.

Le osservazioni di Piazzi seguitarono per parecchi mesi e furono pubblicate nel *Monatliche Correspondenz*, che è stata la prima rivista scientifica di astronomia al mondo, fondato dal direttore dell'Osservatorio Gotha, Franz Xaver von Zach. Carl Friedrich Gauss (1777-1865) le utilizzò per calcolare l'orbita e trovò che effettivamente si trattava di un pianeta situato fra l'orbita di Marte e quella di Giove. Proprio in questa regione del sistema solare ci sarebbe dovuto essere un pianeta, secondo una legge empirica trovata dal matematico tedesco Titius (1729-1796) e poi pubblicizzata da un altro matematico e astronomo tedesco, Johannes Bode (1747-1826).

La legge passata alla storia come legge di Titius-Bode da le distanze dei pianeti dal Sole, ponendo eguale a 10 la distanza Terra-Sole e considerando la sequenza 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, e sommando 4 a ogni numero della sequenza. Si ottiene così 4 per Mercurio, 7 per Venere, 10 per la Terra, 16 per Marte, 52 per Giove, 100 per Saturno, 196 per Urano, 388 per Nettuno, che ancora non era stato scoperto. La posizione corrispondente al 28 era vuota e venne occupata dal piccolo pianeta scoperto da Piazzi, che lo chiamò Cerere, protettrice della Sicilia. Piazzi lo chiamò «pianetino» per le sue piccole dimensioni, circa 950 km contro i 4880 km di diametro di Mercurio e i 2390 km di Plutone. Cerere è comunque di gran lunga il più grande della numerosa famiglia di pianetini situati fra Marte e Giove. Pianetini o asteroidi: il termine asteroide

fu coniato da Herschel perché a causa delle loro piccole dimensioni avevano un'apparenza puntiforme come le stelle, e pertanto, sempre secondo Herschel «non erano meritevoli del nome di pianeti». Da notare il commento di Piazzi: «fra poco anche in cielo ci saranno conti, duchi e marchesi».

La famiglia del sistema solare si arricchisce di un altro importante membro nel 1846, Nettuno. Le osservazioni di Urano avevano mostrato l'esistenza di alcune irregolarità nel moto che a certe determinate epoche accelerava e ad altre ritardava. In base a queste osservazioni un giovane studente di matematica inglese John Adams (1819-1892) e un astronomo dell'Osservatorio di Parigi, Urbain Le Verrier (1811-1877) si dedicarono, indipendentemente l'uno dall'altro allo studio delle perturbazioni di Urano per trovare l'orbita del corpo perturbante. Nel settembre 1845 Adams comunicò i suoi risultati sull'orbita e la posizione predetta per il pianeta sconosciuto al direttore dell'Osservatorio di Cambridge, J. Challis e all'astronomo reale Sir George Biddell Airy, ma forse perché era solo un giovane studente, nessuno si preoccupò di cercare il pianeta nella posizione indicata da Adams e i suoi risultati rimasero nel cassetto del suo direttore. Quasi un anno dopo, il 31 agosto 1846 apparve la nota di Le Verrier, i cui risultati erano in ottimo accordo con quelli di Adams. Quando Challis e Airy se ne accorsero si preoccuparono finalmente di cercare il pianeta ma prima di loro arrivò l'astronomo tedesco Johann Galle (1812-1910) che lo scoprì in una posizione molto prossima a quella predetta.

# Il secolo XIX
# Nasce la nuova astronomia: l’astrofisica

In tutti i secoli precedenti astronomia aveva significato osservare e misurare i moti dei corpi celesti, stimarne le distanze, stabilire delle scale di luminosità; poi con Galileo e con Herschel osservarne alcune caratteristiche fisiche come le montagne e pianure lunari, le macchie solari, la forma e dimensioni della Via Lattea e delle nebulose, ma la loro natura fisica era del tutto ignota. Qual è lo stato della materia di cui sono fatti il Sole e le stelle? Solido, liquido, gassoso? O addirittura, come pensava Aristotele, i corpi celesti sono fatti di una materia diversa da quella dei corpi terrestri?

Qual è la loro temperatura, densità, composizione chimica? Quali sono le ragioni che fanno risplendere il Sole e le stelle in modo costante per millenni? I corpi celesti hanno anch’essi, come tutti i corpi terrestri, un inizio e una fine? Tutte domande a cui sembrava impossibile dare una risposta. Nel 1835 il filosofo francese positivista Augusto Comte nel suo *Corso di filosofia positiva*, per sottolineare che la vera scienza è impossibile se non è basata sull’esperienza, a proposito dei corpi celesti scriveva:

> Noi comprendiamo la possibilità di determinare le loro forme, le loro distanze, le loro dimensioni e moti, mentre

> mai, in nessun modo, saremo capaci di studiare la loro composizione chimica, la loro mineralogia, e la natura degli esseri organici viventi sulla loro superficie [...]. Io resto dell'opinione che la vera temperatura media delle stelle resterà per noi sempre sconosciuta.

Eppure la tecnologia che avrebbe permesso di smentire Comte era già nata.

L'ottico tedesco Joseph Fraunhofer (1787-1826) allo scopo di ottenere telescopi in grado di dare migliori immagini si era dedicato allo studio della rifrazione della luce sia nei diversi colori sia da parte di diversi tipi di vetro. Nel corso di questi esperimenti scoprì che lo spettro del Sole era solcato da numerose sottili righe scure perpendicolari alla direzione in cui la luce bianca era dispersa nei colori dal rosso al violetto. Queste righe erano già state notate dal fisico inglese William Wollaston (1766-1828). Fraunhofer osservò che esse erano presenti anche nello spettro di Venere e anche in quello di alcune stelle. In un primo tempo pensava a possibili difetti strumentali, ma si convinse presto che dovevano essere caratteristiche proprie della luce solare.

Era nata la spettroscopia, la tecnica più potente in grado di svelarci la natura fisica e chimica dei corpi celesti, e non solo, come vedremo. Un grande contributo allo studio degli spettri stellari è stato dato dal gesuita emiliano Angelo Secchi (1818-1878) che si può dire sia stato il vero iniziatore dello studio fisico delle stelle. Il suo contemporaneo, il fisico tedesco Gustav Kirchhoff (1824-1887) con una famosa esperienza ha chiarito il significato delle righe scure.

Angelo Secchi dal suo osservatorio al Collegio Romano osservò gli spettri di tutte le stelle accessibili col suo telescopio, qualche migliaio. Gli spettri erano ottenuti facendo passare la luce delle stelle attraverso un prisma. Il principale risultato ottenuto da Secchi fu che malgrado le stelle osservate fossero circa 4000, i loro spettri potevano essere raggruppati in tre tipi principali: le stelle bianco azzurre, quelle gialle e quelle arancioni, più un quarto tipo che Secchi definì «assai bizzarro e vario». Ad ogni colore corrispondeva un diverso spettro di righe scure. Poche e piuttosto larghe quelle associate al primo tipo, molte e sottili quelle delle stelle gialle di cui fa parte il Sole, ancora molte righe sottili e alcune bande scure per il terzo tipo, mentre il quarto, stelle di colore rosso avevano spettri dominati da larghe bande scure. In un quinto tipo Secchi incluse stelle che oltre alle righe scure presentavano righe brillanti. Secchi intuì che il colore doveva essere un indice della temperatura superficiale della stella. Come un pezzo di ferro portato all'incandescenza diventa prima rosso cupo, poi rosso brillante, poi giallastro e infine bianco azzurro al crescere della temperatura, così le stelle bianco azzurre dovevano essere le più calde e le rosse le più fredde.

Ma cosa significavano le righe scure e perché variavano al variare del colore?

Kirchhoff si era dedicato allo studio degli spettri di vari tipi di corpi, solidi e gassosi, portati all'incandescenza. Un solido quando supera i 700-800 gradi centigradi diventa incandescente ed emette uno spettro continuo, una

striscia luminosa con i colori dell'arcobaleno, la cui massima intensità si sposta dal rosso al violetto al crescere della temperatura. Kirchhoff osservò gli spettri di vari elementi sia gassosi che solidi portati allo stato di vapore. Invece dello spettro continuo si aveva uno spettro di righe brillanti e ciascun elemento aveva un suo spettro caratteristico. Per esempio lo spettro dell'idrogeno mostrava una forte riga rossa, un'altra un po' più debole verdeazzurra, una terza azzurra, una quarta violetta, mentre lo spettro di un gas di sodio è dominato da due forti righe gialle. Infine Kirchhoff pose la sorgente di uno spettro continuo, un metallo incandescente davanti allo spettroscopio e fra il metallo e lo spettroscopio pose un'ampolla contenente gas sodio, a temperatura un po' più bassa di quella del metallo. Vide che nello spettro continuo apparivano due righe scure nel giallo, e togliendo il metallo incandescente riapparivano le due righe gialle. Kirchhoff enunciò allora la sua legge: Ogni corpo è in grado di assorbire le stesse radiazioni che è in grado di emettere. Era chiarito il mistero delle righe scure nello spettro del Sole e delle stelle: i gas più rarefatti e meno caldi assorbono la radiazione proveniente da quelli più profondi e più caldi. Inoltre confrontando in laboratorio gli spettri dei vari elementi, ottenuti portandoli allo stato gassoso con le righe scure presenti negli spettri solare e stellari, si poteva fare un'analisi chimica qualitativa, dire cioè quali elementi erano presenti nelle atmosfere solare e stellari. Le stelle più calde nei cui spettri dominavano le righe dell'idrogeno furono chiamate stelle a idrogeno e quelle come il Sole in cui dominavano le righe dei metalli

stelle metalliche. Ma perché stelle di diversa temperatura avrebbero dovuto avere composizioni chimiche diverse? Solo all'inizio del XX secolo, con la nascita della fisica quantistica e le ricerche di Planck, Bohr, Saha si cominciò a capire che un dato elemento è in grado di emettere o assorbire radiazione solo in determinate condizioni di temperatura e densità. La presenza o meno delle righe dei vari elementi nello spettro di una stella dipendeva non solo dalla composizione chimica ma anche dalle condizioni fisiche – temperatura e densità – del mezzo. Ecco che si poteva passare dall'analisi chimica qualitativa – un elemento è presente oppure no – all'analisi chimica quantitativa: quali elementi sono presenti e in che percentuale e quali sono apparentemente assenti perché le condizioni fisiche non sono adeguate.

Nel 1925 l'astrofisica americana Cecilia Payne in un fondamentale lavoro pubblicato nel libro *Stellar Atmospheres* della Harvard University Press mostrò che la composizione chimica del Sole e delle stelle è praticamente la stessa e le differenze spettrali in stelle di diverso colore dipendevano esclusivamente dalle diverse condizioni fisiche. Oggi sappiamo che il 90% degli atomi sono atomi di idrogeno, 9% di elio e l'1% o anche meno è formato da tutti gli altri elementi e come vedremo la ragione di ciò sta nel modo in cui si formano gli elementi nel corso dell'evoluzione dell'universo e delle singole stelle.

La grande rivoluzione della fisica che ha caratterizzato l'inizio del secolo XX, con la nascita della fisica quantistica da un lato e la teoria della relatività dall'altro,

ci ha dato gli strumenti teorici per la comprensione dell'universo, della sua struttura, origine e evoluzione. Ma non va dimenticato anche un altrettanto fondamentale sviluppo della tecnologia. Abbiamo visto quali e quanti progressi ci sono stati quando, dopo secoli di osservazioni ad occhio nudo, nel 1610 Galileo ha applicato il cannocchiale allo studio del cielo. Da allora fino alla fine dell''800 le osservazioni sono proseguite con telescopi più grandi, con sistemi ottici in grado di correggere le aberrazioni e ottenere immagini migliori, ma sempre dietro l'oculare c'era l'occhio dell'osservatore. Una seconda rivoluzione tecnologica si è avuta con l'invenzione della fotografia. All'occhio dell'osservatore si è sostituita la lastra fotografica. Per capirlo seguiamo per es. la serie di operazioni che doveva fare Padre Secchi quando osservava gli spettri delle stelle. Primo, doveva abituarsi all'oscurità, per poter scorgere i minimi dettagli di quelle deboli striscioline colorate che erano gli spettri stellari. Doveva poi usando una debole luce disegnare quello che aveva visto, un processo altamente soggettivo, dipendente dalla sua memoria visiva e dalla sua abilità di disegnatore. Infine doveva di nuovo adattarsi all'oscurità prima di intraprendere la successiva osservazione, e così via.

Con l'introduzione della tecnica fotografica, l'immagine viene fissata sull'emulsione; prolungando opportunamente l'esposizione si possono ottenere le immagini degli spettri troppo deboli per essere visti; queste immagini ottenute in modo completamente oggettivo possono poi essere studiate a tavolino, si possono compiere delle misure

quantitative su di esse, sull'intensità degli annerimenti e sulla posizione delle righe. È chiaro il vantaggio in rapidità e affidabilità delle osservazioni che l'introduzione della fotografia ha portato rispetto all'osservazione visuale.

Nel corso del XX secolo la tecnologia ha fatto passi da gigante, i telescopi sono divenuti più potenti e lo sviluppo dell'elettronica e dell'informatica ha portato a concezioni completamente nuove. La fotografia è stata sostituita da recettori elettronici molto più sensibili, mentre le sonde interplanetarie e i satelliti astronomici hanno aperto nuovi orizzonti.

Vedremo come si sia dilatata la conoscenza del nostro sistema solare, come la formazione, evoluzione e fine delle stelle rappresenti ormai un argomento ampiamente studiato e ben compreso, come la cosmologia non sia più soltanto oggetto di astratte speculazioni ma sia divenuta una scienza sperimentale, soggetta a verifiche osservative.

# Il sistema solare e la sua origine

Per quanto possa sembrare strano, prima dell'inizio dell'era spaziale gli astronomi conoscevano molto meglio la struttura fisica delle lontane stelle che non quella dei pianeti tanto più vicini a noi.

Infatti la stella più vicina, escludendo il Sole, si trova a più di quattro anni luce, mentre il pianeta più lontano, Plutone si trova a circa 5 ore luce. Però le stelle emettono luce propria e analizzando i loro spettri ricaviamo un enorme numero di informazioni sulla loro natura fisica e la loro composizione chimica. Inoltre le stelle sono corpi completamente gassosi e il gas è lo stato più semplice della materia. I pianeti invece riflettono la luce del Sole e le informazioni che possiamo trarre dai loro spettri riguardano solo alcune caratteristiche della loro atmosfera che assorbe la luce solare riflessa. Inoltre sono corpi in parte solidi, in parte liquidi, in parte gassosi, quindi con una struttura molto più complessa di quella delle stelle. Le immagini della superficie dei pianeti sono in parte offuscate dai moti della loro e della nostra atmosfera e le informazioni che possiamo trarne sono assai scarse. Le sonde spaziali che sono andate a guardare da vicino i pianeti e i loro satelliti e come nel caso della Luna, di Venere, di Marte e di Titano vi sono addirittura atterrate, hanno dilatato le nostre conoscenze.

Prima dell'era spaziale si sapeva pochissimo sulle condizioni della nostra vicina Venere, ritenuta quasi la

gemella della Terra perché la sua massa e il suo raggio erano solo leggermente inferiori a quelli terrestri. Eppure le sue condizioni fisiche non avrebbero potuto essere più diverse da quelle terrestri. La sua densa atmosfera, composta prevalentemente di anidride carbonica, formava una perenne coltre nuvolosa che ci impediva di osservare la superficie e determinare il periodo di rotazione. Da alcune nubi presenti nell'alta atmosfera si era stimato un periodo di rotazione di pochi giorni, e si riteneva che la temperatura al suolo fosse poco più alta di quella terrestre, circa 50 gradi centigradi, a causa della maggior vicinanza al Sole. Invece la serie di sonde sovietiche da Venera 4 a Venera 16 entrate in orbita attorno a Venere o addirittura atterrate sulla sua superficie fra il 1967 e il 1983 hanno misurato una temperatura al suolo di 480 gradi centigradi e una pressione di 90 atmosfere, condizioni insopportabili per qualsiasi essere vivente, a parte le mitiche salamandre. Probabilmente la densa atmosfera di Venere ha prodotto un efficacissimo effetto serra, responsabile dell'innalzamento della temperatura.

Il periodo di rotazione di 243,16 giorni è più lungo del periodo di rivoluzione di 225 giorni. Quindi su Venere il giorno è più lungo dell'anno. Sia Venera 15 e 16 che le sonde americane Mariner e Magellano hanno esaminato la topografia del pianeta utilizzando la tecnica degli eco radar. È un pianeta piuttosto piatto, con qualche depressione e rare montagne non troppo alte.

Dei pianeti sconosciuti nell'antichità, Urano e Nettuno, si conoscevano con molta imprecisione i dati fisici,

che sono stati poi misurati dalla sonda Voyager 2 rispettivamente nel 1986 e nel 1989.

Di Urano va ricordata una sua caratteristica unica: il suo asse di rotazione giace quasi sul piano dell'orbita, per cui si potrebbe dire che Urano rotola su questo piano.

L'ultimo e assai discusso pianeta è Plutone, scoperto nel 1930 da Clyde Tombaugh all'osservatorio di Flagstaff in Arizona. Plutone è di gran lunga il più piccolo dei pianeti, col suo diametro di 2390 km, la metà di quello di Mercurio, ma molto più grande del più grande pianetino, Cerere, scoperto da Piazzi, di forma allungata coi suoi diametri di 960 e 932 km. Plutone presenta altre particolarità che hanno messo in dubbio la sua appartenenza alla classe dei pianeti. Ha un'orbita notevolmente ellittica, e a certe epoche viene trovarsi all'interno dell'orbita di Nettuno, e il piano dell'orbita è inclinato di ben 17 gradi sul piano dell'eclittica. Per queste sue caratteristiche si sospetta che in passato sia stato un satellite di Nettuno strappato al suo pianeta a causa delle perturbazioni causate dagli altri pianeti giganti. Comunque fino a che Plutone è rimasto un caso unico, ha mantenuto il suo ruolo di nono pianeta. In questi ultimi anni, grazie alle sonde e ai telescopi per l'infrarosso si sono andati scoprendo altri piccoli pianeti al di là dell'orbita di Plutone, di dimensioni paragonabili o anche più grandi di Plutone. Perciò durante l'ultima assemblea generale dell'Unione astronomica Internazionale tenuta a Praga nell'agosto 2006 fu deciso di istituire un'altra categoria di corpi appartenenti al sistema solare, i pianetini ultraplutoniani o plutini e declassare quindi Plu-

tone da pianeta a pianetino. È evidente che si tratta solo di una questione di nomenclatura, ma questa decisione ha suscitato malumori e proteste non solo fra alcuni addetti ai lavori, ma anche fra molte persone con interessi astronomici o anche astrologici, come se cambiasse qualcosa di sostanziale nel sistema solare. Alcuni l'hanno addirittura considerata un'ingiustizia, un'offesa fatta al povero Plutone, come se fosse in grado di soffrire per essere stato retrocesso in serie B; altri una ferita inferta al sistema solare, come se avesse perso un pianeta.

Comunque oggi è chiaro che oltre alla fascia principale di pianetini, situata fra le orbite di Marte e Giove, ce n'è una i cui membri orbitano attorno al Sole più o meno alla stessa distanza a cui orbita la Terra. Sono stati chiamati NEO, un acronimo che significa Near Earth Objects, oggetti vicini alla Terra, o anche NEA Near Earth Asteroids. Le loro orbite hanno tutte le possibili inclinazioni rispetto all'eclittica, il che rende molto improbabile, ma non nullo, il rischio di un impatto col nostro pianeta. Perciò si sono formati alcuni gruppi di astronomi che continuamente osservano questi oggetti per determinarne accuratamente le orbite, scoprirne di nuovi e prevedere se ci sia effettivamente il rischio di uno scontro. Due sistemi molto sofisticati per sorvegliare in continuazione la popolazione dei NEA si trovano al Jet Propulsion Laboratory della NASA e presso l'Università di Pisa. Proprio il giorno di Natale del 2004 arrivò la conferma che un asteroide scoperto in giugno aveva un'orbita indicante una non trascurabile probabilità di impatto con la Terra. L'asteroide, che ha un diametro di

300 metri, fu battezzato Apophis, nome di un dio egiziano, che significa ‘Il distruttore’. Il 13 aprile 2029 passerà a soli 37.500 km dalla Terra, una distanza pari a meno di 6 raggi terrestri e circa eguale a quella a cui orbitava il primo satellite astronomico in orbita stazionaria, (cioè una distanza a cui il periodo di rivoluzione attorno alla Terra è di un giorno) l’International Ultraviolet Explorer. Sarà tanto splendente da poterlo osservare ad occhio nudo. Sette anni dopo, il 13 aprile 2036 Apophis dovrebbe veramente scontrarsi con la Terra, con conseguenze che potrebbero essere catastrofiche per l’intero pianeta. Ad un evento simile si attribuisce la scomparsa dei dinosauri 65 milioni di anni fa. Oggi però si stanno sviluppando varie strategie per non fare la fine dei dinosauri. La più immediata è quella di colpirlo con un missile nucleare. Se il pianetino è composto di rocce e ghiaccio sarà facilmente distrutto. Se invece ha una struttura metallica, potrebbe venire soltanto sbriciolato in tanti frammenti che comunque potrebbero colpire la Terra. Un altro metodo consiste nell’installare sulla sua superficie un ordigno, una specie di rimorchiatore, in grado di spostarlo su un’orbita leggermente diversa. Oppure, ancora più ingegnoso sarebbe colpire la superficie con un laser in grado di far uscire gas e polveri che creerebbero col loro getto un motore a razzo naturale. O anche si potrebbe coprire gran parte della superficie con materiale riflettente così da sfruttare la pressione di radiazione solare. Altra possibilità urtarlo con un’astronave abbastanza grossa e massiccia che distruggendosi sulla sua superficie potrebbe fargli cambiare traiettoria.

Tutte queste tecnologie basate sull'atterraggio sull'asteroide sono già sperimentate perché già alcune sonde sono scese su pianetini e comete e l'incontro con pianeti e satelliti è stato realizzato con grande precisione. Ricordo che già nel 1986 la sonda Giotto dell'Agenzia spaziale europea arrivò all'appuntamento con la cometa di Halley in perfetto orario e la navicella Huygens è atterrata su Titano nel gennaio 2005 dopo un viaggio durato sette anni.

Al confine del sistema solare troviamo la famiglia dei plutini, anche detti pianeti nani, includente ora anche Plutone, che occupa quella vasta fascia ai confini del sistema solare, chiamata la fascia di Kuiper. Gerard Kuiper (1905-1973) era un astronomo statunitense, di origine olandese, che ha dato importanti contributi allo studio del sistema solare, anche utilizzando le moderne tecnologie spaziali. Ormai si conosce più di una diecina di plutini, tutti scoperti a partire dal 2000 e a distanze dal Sole comprese fra 39,5 unità astronomiche (dove l'unità astronomica U.A. è la distanza media Terra-Sole) eguale a quella di Plutone e circa 55 U.A. Di gran lunga più lontano è il pianetino Sedna che alla sua massima distanza dal Sole si trova a ben 525 U.A. e compie un'intera rivoluzione in circa 10.500 anni. Da Sedna il Sole si vedrebbe come un minuscolo dischetto, quasi indistinguibile da una stella.

Oltre a questi che hanno masse comprese fra un decimo e 10 volte quella di Plutone ce ne sono moltissimi altri minori che costituiscono la fascia di Kuiper. Si stima che questa regione sia estesa da circa 35 a più di 1000 U.A., abbastanza strettamente concentrata sul piano del-

l'eclittica, con inclinazioni in gran maggioranza eguali o inferiori a quella di 17 gradi di Plutone e contenga più di un miliardo di oggetti. Da essa proverrebbero le comete periodiche; qualcuno di questi oggetti, a causa delle perturbazioni gravitazionali, viene trascinato verso l'interno del sistema solare e avvicinandosi al Sole in parte evapora sviluppando la coma e la coda caratteristica delle comete. L'estrema periferia del sistema solare è ancora più lontana, ben oltre la fascia di Kuiper e costituisce la nube di Oort. Ian Oort (1900-1992) è stato il maestro di Kuiper, e direttore dell'osservatorio di Leida. Oltre ad essere stato uno dei pionieri nello studio della Galassia utilizzando le osservazioni radioastronomiche, si era dedicato allo studio delle comete e aveva ipotizzato che le comete a lungo e lunghissimo periodo provenissero da una regione circondante il sistema solare ed estesa fra 30.000 e più di 100.000 U.A., cioè più di un anno luce. È possibile che i confini della nube di Oort circondante il sistema solare lambiscano e si confondano con quelli di un'analoga nube che potrebbe circondare il sistema di Alfa Centauri formato da Alfa Centauri A, simile al Sole, Alfa Centauri B poco più fredda, a 4,33 anni luce e infine una terza compagna Proxima Centauri, orbitante a grande distanza attorno al baricentro delle prime due, che dista da noi 4,22 anni luce.

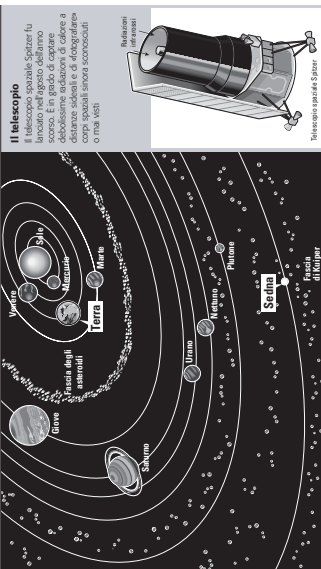
La scoperta di Sedna nel novembre 2003, anche se per ora è solo il più lontano dei pianeti nani, suscitò grande interesse anche fra la gente comune; si cominciò a parlare del mitico decimo pianeta e gli astrologi si sbizzarrirono

# AI CONFINI

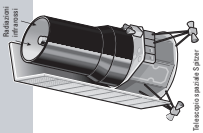
Ufficialmente il Sistema solare ha nove pianeti. L'ultimo, Plutone, fu scoperto nel 1930

**I numeri del Sistema solare**

| Pianeta | Diametro | Distanza media dal sole |
|---|---|---|
| Mercurio | 4.880 km | 58 milioni km |
| Venere | 12.140 km | 108 milioni km |
| Terra | 12.756 km | 150 milioni km |
| Marte | 6.787 km | 228 milioni km |
| Giove | 142.800 km | 778 milioni km |
| Saturno | 120.660 km | 1,4 miliardi km |
| Urano | 51.800 km | 2,9 miliardi km |
| Nettuno | 49.500 km | 4,5 miliardi km |
| Plutone | 2.300 km | 5,9 miliardi km |
| Sedna | 2000 km | 13 miliardi km |

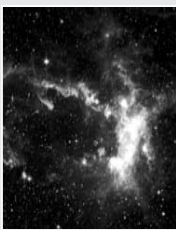
Venere
Sole
Mercurio
Giove
Fascia degli asteroidi
Terra
Marte
Saturno
Urano
Nettuno
Plutone
Sedna
Fascia di Kuiper

**Il telescopio**

Il telescopio spaziale Spitzer fu lanciato nell'agosto dell'anno scorso. È in grado di captare debolissime radiazioni di calore a distanze siderali e di «fotografare» corpi spaziali sinora sconosciuti o mai visti

Radiazioni infrarossi

Telescopio spaziale Spitzer

# «Avvistato il mitico decimo pianeta»

*L'annuncio della Nasa: è oltre l'orbita di Plutone. Chiamato Sedna, è fatto di roccia e ghiaccio. Scettici alcuni scienziati*

DALLO SPAZIO PROFONDO

**NEBULOSA** Henize 206, «catturata» dal telescopio spaziale Spitzer

**GALASSIA** Messier 81, fotografata da Spitzer

**ELEFANTE** La nebulosa Proboscide di elefante, distante anni luce

L'ASTROLOGO

## «Avremo oroscopi più precisi: darà un influsso positivo»

«Il nuovo pianeta? Se si dovesse accertarne l'esistenza, nel compilare gli oroscopi avremmo uno strumento in più, elementi finora sconosciuti, perché avrà significati e simbologie che ci daranno informazioni su ulteriori caratteristiche delle persone e della collettività. Ma questa scoperta, in fondo, era attesa da tempo». Antonio Capitani, astrologo (le sue interpretazioni sono note ai lettori di *Astra* e agli spettatori di *Doppio Espresso*, su SkyTg24), non è stato colto di sorpresa dall'annuncio degli astronomi americani.

**Sta dicendo che se l'aspettava?**

«Di questo pianeta transplutoniano noi astrologi parliamo già dagli anni '70. Lisa Morpurgo aveva ipotizzato l'esistenza di altri due pianeti oltre Plutone: in totale, oltre alla Terra (il punto d'osservazione) e compresi Sole e Luna (che in astrologia per comodità sono chiamati pianeti) dovrebbero esserene altri 12, come i segni zodiacali. Ne manca ancora uno...»

**Come interpreta questo avvistamento?**

«La scoperta di ogni pianeta è sempre coincisa con una svolta nel destino dell'umanità: Urano è stato scoperto pochi anni prima del 1789, e infatti rappresenta tutto ciò che è rivoluzionario. Plutone simboleggia i meandri più oscuri della psiche, ed è stato avvistato quando Freud pubblicò i suoi studi sull'inconscio. Quello appena scoperto è un pianeta che rappresenta il trionfo della naturalità. Si contrappone allo Scorpione e a Plutone, simboli della putrescenza, delle malattie degenerative. La svolta potrebbe essere proprio la sconfitta dei tumori e dell'Aids. Anche perché questo, tra l'altro, è un pianeta femminile».

Antonio Capitani: rappresenta il trionfo della naturalità ed è benefico per le donne

**I pianeti hanno un «genere»?**

«Certo. Si dividono in maschili e femminili in base alle loro caratteristiche, che si possono rintracciare anche nella natura del segno che governano. Questo pianeta, che noi chiamiamo X o Proserpina (mentre quello ancora da scoprire è Y o Vulcano) trova il proprio dominio massimo nel segno del Toro: un segno femminile, simbolo di chi dà la vita, diametralmente opposto allo Scorpione, il "cimitero" dello Zodiaco. Sotto questo segno si colloca Proserpina, pianeta femminile, che aprirà il futuro alle donne. Non è un caso, ad esempio, che il vaccino contro l'Aids che sta dando più risultati sia stato messo a punto da Barbara Ensoli. In generale si innescherà un processo di riscoperta del grande valore della donna, nella ricerca come anche in politica, come messaggera di pace. Ovviamente Proserpina c'è sempre stato; siamo noi a scoprirlo solo quando siamo pronti a recepirne i simboli. Avvistandolo è come se facessimo luce dentro noi stessi».

**Gabriela Jacomella**

È il più lontano corpo celeste scoperto intorno al Sole e ha fatto improvvisamente risorgere il mito del «decimo pianeta». Si muove nel buio, oltre i confini segnati dal piccolo e freddo Plutone, in un vuoto sempre più popolato da oggetti sconosciuti sino a epoche recenti. Lo hanno battezzato Sedna, la dea del mare degli Inuit, un popolo che vive tra i ghiacci del Polo Nord, e proprio le sue ragguardevoli dimensioni hanno subito spinto a ipotizzare la scoperta del fantomatico «pianeta X» inseguito da oltre un secolo.

Ma i più lo giudicano solo il più grande oggetto della fascia di Kuiper che chiude il territorio del Sistema solare. Qui a partire dal 1992 sono stati individuati nuclei di materiale ghiacciato battezzati «oggetti trasnettuniani». E più si affinano i mezzi di osservazione se ne trovano di taglie crescenti: il mese scorso era stato fotografato «2004 DW» con un diametro di 1800 chilometri; ora Sedna, oltre due volte più distante di Plutone, ha un diametro di circa duemila chilometri e perciò è quasi della stessa dimensione di Plutone (2300 chilometri).

**10.500 ANNI** è il periodo di tempo che Sedna, il decimo pianeta, impiega per compiere un giro completo intorno al Sole

**LA SCOPERTA** — A scoprirlo sono stati nel novembre scorso un gruppo di astronomi guidati da Mike Brown del California Institute of Technology utilizzando l'osservatorio di Monte Palomar. La conferma e la definizione delle sue caratteristiche sono poi arrivate con il telescopio spaziale Spitzer della Nasa, capace di scrutare il cielo nella radiazione infrarossa.

«Dalla superficie di Sedna il Sole è una capocchia di spillo», ha raccontato Brown. Come gli altri «fratelli» trasnettuniani è formato di roccia e ghiaccio. L'orbita su cui viaggia è molto ellittica e per compiere un giro completo intorno al Sole impiega addirittura 10.500 anni terrestri. Quando si trova più vicino all'astro potrebbe avere una tenue atmosfera che poi, ghiacciandosi mentre si allontana, precipita al suolo, proprio come accade su Plutone.

**IL CONFRONTO** — La somiglianza fra i due è davvero notevole e porta acqua al mulino di coloro che ritengono Plutone uno dei tanti oggetti trasnettuniani. Anzi, proprio in base a queste considerazioni, qualche anno fa l'Unione astronomica internazionale aveva proposto formalmente di cancellarlo dall'elenco dei pianeti. Una pioggia di critiche da parte di diversi astronomi ma soprattutto dei moltissimi fans plutoniani, fece riporre l'idea nel cassetto. L'evidenza, tuttavia, sembra orientare in questa direzione. Ma non è detto. Le prime valutazioni di Sedna rivelano, al contrario di altri oggetti trasnettuniani, un'orbita molto stabile e ciò, secondo diversi scienziati, è un elemento favorevole alla classificazione come pianeta. Di sicuro le discussioni si faranno ora più accese. Però una parola più precisa potrà dirla solo una sonda che la Nasa sta costruendo per sorvolare Plutone e il cui viaggio, come molti propongono, dovrebbe continuare avvicinando anche qualcuno di questi corpi ghiacciati. Solo allora il confronto potrà decretare vincitori e vinti.

**Giovanni Caprara**

IL COMMENTO

# Quella nube primordiale «culla» delle comete

di **MARGHERITA HACK**

*Dopo la scoperta di Urano, avvenuta ad opera di Wilhelm Herschel nel 1781, ci si cominciò a chiedere se ci fossero altri pianeti ancora più lontani. Le irregolarità del moto del pianeta fecero intuire che ci doveva essere un altro corpo che ne disturbava gravitazionalmente il moto. Fu così che Adams a Cambridge e Le Verrier a Parigi riuscirono a prevedere la posizione dell'ignoto corpo, che fu effettivamente trovato da Johann Galle il 23 settembre 1846, nella posizione calcolata. Diventò allora un problema di grande attualità la ricerca di altri pianeti. Fu così scoperto Plutone nel 1930. Ma la ricerca non si fermò. Da molto tempo gli astronomi si domandano se Plutone è davvero l'ultimo pianeta o se ce ne sono altri, ancora più lontani dal Sole e quindi difficilmente osservabili a causa del loro debolissimo splendore. Comunque quello che è certo è che il sistema solare non finisce con l'orbita di Plutone.*

*Tutto il sistema è avvolto in quella che si chiama la nube di Oort, che si pensa si estenda addirittura fino a uno o due anni luce dal Sole e che è ciò che resta della grande nebulosa protoplanetaria, dopo la formazione dei pianeti. Da lì arrivano ogni tanto grossi sassi cosmici, che entrando dentro il Sistema solare danno origine alle comete a lungo o lunghissimo periodo (migliaia o anche milioni di anni) o che forse dopo il loro passaggio vicino al Sole se ne allontaneranno di nuovo per non tornare più.*

La scoperta nella zona dove ci sono i resti della grande nebulosa da cui nacquero i corpi celesti

*Entro la nube di Oort è inclusa la fascia di Kuiper, una regione che si estende dall'orbita di Plutone fino a circa 1000 volte la distanza Terra-Sole, cioè circa 150 miliardi di chilometri. Da questa fascia provengono le comete periodiche con periodi relativamente brevi, e là dentro orbitano anche numerosi pianetini. Mentre le comete hanno orbite molto allungate e dai confini del Sistema solare si portano vicino al Sole, sviluppando la lunga coda e la chioma gassosa, i pianetini hanno orbite quasi circolari e sono destinati a restare nelle fredde e buie regioni oltre Plutone.*

**SCIENZIATA** Margherita Hack

*Si suppone che fra i tanti pianetini ce ne sia qualcuno più grosso, come Plutone o anche più grande che possa considerarsi un vero e proprio pianeta. In questi ultimi anni sono stati scoperti alcuni oggetti al limite fra pianetino e pianeta: Quaoar, scoperto nel 2002, con un diametro di circa 1200 chilometri, circa la metà di Plutone, Ixion scoperto nel 2001 con un diametro di 1065 chilometri, Veruna scoperto nel 2000, diametro di circa 900 chilometri. Ora astronomi americani, utilizzando sia il telescopio di Monte Palomar che il telescopio spaziale Spitzer, particolarmente sensibile alle radiazioni infrarosse emesse da corpi a bassissima temperatura, hanno scoperto un corpo di diametro compreso fra 1180 e 2369 chilometri, quindi paragonabile a Plutone, a una distanza di 13 miliardi di chilometri, più del doppio di quella di Plutone. Lo hanno chiamato Sedna. Possiamo considerarlo il decimo pianeta?*

Nel 1930 fu identificato Plutone. Da allora si è cercato fino alle propaggini estreme

*Il telescopio spaziale Spitzer (dal nome dell'astronomo che ha diretto l'osservatorio di Princeton) ha sensibilissimi rivelatori delle radiazioni infrarosse, che vengono completamente assorbite dalla nostra atmosfera, e che sono quelle che emettono corpi a temperature molto basse, -200 o 250 gradi centigradi, e quindi particolarmente adatto per scoprire questi lontani corpi.*

*È probabile che si trovino altri oggetti di natura incerta: pianeta o pianetino? Forse il telescopio Spitzer e il futuro successore del telescopio spaziale, molto più grande del telescopio Hubble e particolarmente adatto alle osservazioni nell'infrarosso lontano (lunghezze d'onda superiori ai 50 micron) daranno una risposta a questa corsa alla scoperta delle più lontane propaggini del Sistema solare. Almeno se i fondi per la ricerca spaziale non saranno tutti assorbiti dall'esplorazione umana di Marte.*

nel pronosticare i suoi effetti scrivendo le cose più assurde. In un articolo apparso sul Corriere della sera del 16 marzo 2004, a fianco di un articolo del giornalista scientifico Giovanni Caprara sulle caratteristiche fisiche e orbitali di Sedna, e di uno mio sulla nebulosa primordiale da cui è nato il sistema solare, un astrologo intervistato da una giornalista affermava che il nuovo pianeta «rappresenta il trionfo della naturalità. Si contrappone allo Scorpione e a Plutone, simboli della putrescenza, delle malattie degenerative. La svolta potrebbe essere proprio la sconfitta dei tumori e dell'Aids. Anche perché questo, tra l'altro, è un pianeta femminile».

Così, non solo impariamo che ci sono i pianeti maschili e femminili, ma anche che hanno virtù terapeutiche, ma soltanto quando li scopriamo, sebbene fossero sempre lì a girare intorno al Sole, indifferenti al fatto che noi lo sapessimo o no. Si possono immaginare stupidaggini più grosse, ammanite al pubblico senza un commento, insieme a due articoli che riportano dati scientifici, dando così ad intendere che astronomia e astrologia sono ambedue scienze ad egual diritto.

Quindi basta spendere soldi per le ricerche sul cancro o sui vaccini contro l'Aids, basta con le ricerche sulle cellule staminali; indaghiamo invece quali miracoli può fare un plutino o un NEO, determiniamone il sesso e soprattutto applichiamo anche ad essi la legge sulle pari opportunità.

Fino ad oggi tutti i corpi del sistema solare sono stati osservati dallo spazio, con sonde che sono andate a

guardarli da vicino, oppure ci sono atterrate sopra. Solo Plutone non è stato ancora raggiunto però è stato osservato dal telescopio spaziale HST che ci ha mandato delle belle immagini del pianeta e del suo satellite Caronte. La sonda New Horizons in viaggio dal 2006 raggiungerà Plutone nel 2015 e proseguirà l'esplorazione degli oggetti transnettuniani.

Mercurio è stato per ora il meno studiato. La prima sonda, Mariner 10 lo raggiunse e gli girò attorno tre volte nel 1974 mostrandoci la sua immagine così simile alla Luna. Solo nel 2004 la NASA ha inviato la sonda Mercury Messenger e le due agenzie NASA ed ESA stanno studiando un'altra missione che è stata intitolata a Bepi Colombo (1920-1984), uno dei maggiori meccanici celesti del XX secolo e già docente dell'Università di Padova, a cui si deve la tecnica del rimpallo gravitazionale, di sfruttare cioè l'attrazione gravitazionale di uno o più pianeti per modificare la traiettoria di una sonda. Mercurio ha un periodo di rotazione di 58 giorni mentre il suo periodo di rivoluzione è di 88 giorni; i due numeri stanno in un rapporto di 2/3 e fu Colombo a capire che si tratta di un fenomeno di risonanza orbitale.

Il pianeta più interessante dal nostro punto di vista umano è certamente Marte. Come nel caso della Terra, anche l'equatore di Marte è inclinato rispetto al piano dell'orbita di circa 25 gradi, un valore di poco superiore ai 23,5 della Terra. Poiché è questa inclinazione che da luogo al fenomeno delle stagioni, anche su Marte ci sono le stagioni come sulla Terra. La durata del giorno mar-

ziano è 25 ore, di poco superiore al giorno terrestre. Per quanto riguarda le sue condizioni fisiche è l'unico su cui in passato c'è stata abbondanza di acqua allo stato liquido, e forse c'è ancora nel sottosuolo; ha una tenue atmosfera, prevalentemente di anidride carbonica, che da luogo a un debole effetto serra. Il risultato è che l'escursione termica fra il giorno e la notte, pur essendo molto maggiore che sulla Terra, ha valori sopportabili. Per esempio, all'equatore, d'estate la temperatura di giorno può raggiungere i 20 gradi centigradi, e di notte scendere a –85. Sempre meglio della Luna o di Mercurio, in cui l'assenza di atmosfera, e quindi di effetto serra, nella parte illuminata dal Sole è rispettivamente +100 e +350 gradi centigradi, mentre nella parte in ombra è di circa –100 e –150 gradi centigradi.

Per queste sue caratteristiche Marte potrebbe avere ospitato forme di vita elementare e forse ospitarle ancora oggi nel sottosuolo. Le varie sonde che sono atterrate su Marte (i due Viking nel 1976, Pathfinder nel 1997, Spirit e Opportunity nel 2004) avevano come scopo principale quello di accertare la presenza di acqua e cercare eventuali forme di vita presenti o fossilizzate. Sebbene la presenza di acqua nel passato sembri accertata, e sia certa quella di ghiaccio d'acqua ai poli, per ora non è stata trovata nessuna evidenza di forme di vita.

Le sonde spaziali sono state essenziali per la conoscenza dei pianeti giganti. Le immagini delle superfici di Giove e di Saturno erano abbastanza dettagliate, ma le caratteristiche di Urano e Nettuno erano quasi del tutto

sconosciute. Giove e dintorni furono visitati per la prima volta nel 1973 dalle due sonde Pioneer 10 e 11, poi nel 1979 da Voyager 1 e 2 e infine nel 1995 da Galileo.

Saturno, i suoi satelliti ed anelli sono stati visitati da Pioneer 11 nel 1979 e da Voyager 2 nel 1981, mentre la Cassini-Huygens è arrivata a Saturno il giorno di Natale 2004; la navicella Huygens ha poi proseguito verso Titano dove frenata da più paracadute è atterrata sulla sua superficie.

Urano è stato raggiunto da Voyager 2 nel 1986 e tutti abbiamo potuto ammirare in televisione la sua superficie di un tenue colore verdemare dovuto alla presenza di metano nell'atmosfera, che assorbe la componente rossa della luce solare. Nettuno è stato raggiunto da Voyager 2 nel 1989. Voyager 2 è stata l'unica sonda che ha visitato tutti e quattro i pianeti giganti. Anche Nettuno lo abbiamo visto in televisione, un disco di un intenso colore azzurro solcato qua e là da qualche nuvoletta bianca.

Oggi sappiamo che Saturno non è il solo ad avere un sistema di anelli; sebbene il suo sia straordinariamente complesso, anche Giove, Urano e Nettuno hanno il loro e tutti e quattro hanno una numerosa schiera di satelliti, almeno 16 Giove, 18 Saturno, 15 Urano e 8 Nettuno.

Da notare che solo Mercurio e Venere non hanno satelliti, Marte ne ha due minuscoli, in realtà si tratta di due asteroidi – Phobos le cui dimensioni in km sono 26,8×22,4×18,4, e Deimos ancora più piccolo 15,0×12,2×10,4. La Terra con la Luna e Plutone con Caronte più che un pianeta col suo satellite si potrebbero

definire pianeti doppi. La Luna ha un diametro poco più di un quarto di quello terrestre e massa 81 volte più piccola; Caronte ha un raggio metà di quello di Plutone e massa circa 8 centesimi di quella di Plutone. Per confronto Ganimede, il più grande satellite di Giove, e più grande di Mercurio, ha un diametro 27 volte più piccolo e una massa quasi 13.000 volte più piccola di Giove; Titano ha un raggio 23 volte più piccolo di quello di Saturno e una massa circa 4000 volte più piccola.

## *Cosa sappiamo sull'origine del sistema solare?*

Uno dei primi tentativi di spiegare l'origine del sistema solare fu fatto da Cartesio nel 1644. Egli pensava che la materia primordiale fosse un fluido in rotazione. La maggior parte della materia si sarebbe accumulata al centro formando un gran vortice che avrebbe dato origine al Sole; alcuni vortici minori avrebbero originato i pianeti, e poiché la massa fluida ha un moto di rotazione comune, i pianeti continuerebbero a girare attorno al Sole. Kant nel 1755 propone che il sistema solare si sia formato da condensazioni in un disco rotante attorno al centro dove si stava formando il Sole. Non si spiegava come si formassero le condensazioni, ma rendeva conto del fatto che tutti i pianeti orbitano su piani quasi coincidenti col piano dell'orbita terrestre e tutti orbitano nello stesso senso, cioè in senso antiorario per un osservatore situato fuori della Terra sopra il Polo Nord.

Nel 1796 Laplace cercò di spiegare perché pochi pianeti ruotino in orbite quasi circolari molto separate l'una dall'altra. La contrazione del disco ruotante fa aumentare la velocità di rotazione, e la forza centrifuga separerebbe la materia in tanti anelli concentrici, da cui si formerebbero i pianeti.

Sebbene tutte queste ipotesi non rendano conto di molti fatti, tutte assumono un'origine comune per il Sole e i pianeti.

Le difficoltà di spiegare perché la materia dovrebbe dare origine a una grossa massa in contrazione da cui nascerebbe il Sole e a una massa minore che si separa in tanti anelli rotanti, uno per ogni pianeta, invece di dar luogo più semplicemente a un disco di densità decrescente verso l'esterno, perché il Sole ruota così lentamente attorno al proprio asse, furono tutte ragioni che portarono ad abbandonare l'ipotesi Kant-Laplace della nebulosa rotante.

Un'ipotesi completamente diversa fu proposta agli inizi del '900 dal fisico inglese James Jeans (1877-1946): è la cosiddetta ipotesi mareale. Egli supponeva che in un casuale incontro ravvicinato del Sole con un'altra stella, questa strapperebbe al Sole un getto di gas da cui raffreddandosi si sarebbero formati i pianeti. Poiché la distanza media di una stella dall'altra nella nostra Galassia è circa 100 milioni di volte il diametro medio di una stella, un passaggio ravvicinato di due stelle è un evento estremamente raro; quindi il nostro sistema solare sarebbe un caso praticamente unico.

Poiché la vita può svilupparsi solo su i pianeti, perché le stelle hanno temperature eccessivamente alte, il mezzo interstellare è estremamente rarefatto, la vita sarebbe possibile solo nel sistema solare.

A parte le difficoltà teoriche di spiegare la formazione dei pianeti con questa teoria, le osservazioni la contraddicono. In questi ultimi quindici anni si sono cominciati a scoprire pianeti extrasolari, in orbita cioè attorno ad altre stelle. Questi sono tanto numerosi che oggi cominciamo a pensare che la formazione di una stella è spesso o forse sempre accompagnata dalla formazione di un sistema planetario. Inoltre l'osservazione di nebulose a forma di disco attorno a stelle di recente formazione ha rimesso in auge l'ipotesi della nebulosa protoplanetaria di Kant-Laplace.

I progressi delle tecniche radioastronomiche già durante gli anni '60 avevano permesso di osservare che negli addensamenti di materia interstellare, le cosiddette nubi interstellari, c'è una gran varietà di molecole, anche abbastanza complesse. Queste molecole sono delle minuscole radiotrasmittenti sintonizzate su lunghezze d'onda da pochi centimetri a pochi millimetri. Esse poi si aggregano a formare le polveri interstellari, cioè minuscole particelle solide, con diametri inferiori al micron, per lo più silicati e grafite. Le polveri sono molto importanti per la formazione di una stella. Infatti perché si cominci a formare un addensamento di gas e polveri è necessaria una massa limite, tanto più grande quanto maggiore è la temperatura del gas e minore la sua densità, affinché la forza di gravità prevalga sulla tendenza del gas a disperdersi. Le

polveri, la cui massa è enorme rispetto a quella dei singoli atomi o anche delle singole molecole, ha l'effetto di raffreddare il miscuglio di gas e polveri favorendo il collasso gravitazionale. Qui bisogna intendere cosa significa raffreddamento. La temperatura del gas è misurata dalla velocità di agitazione termica delle particelle; gli atomi e le molecole urtando contro i granelli di polvere tanto più grossi perdono velocità e ciò facilita l'inizio del collasso. Il collasso si arresterà quando la temperatura al centro della massa collassante sarà sufficientemente alta perché la forza di pressione dovuta all'agitazione termica delle particelle sia sufficiente ad equilibrare la forza di gravità. Così si è formato il Sole circa 5 miliardi di anni fa. Attorno ad esso seguitò ad addensarsi materia formando un disco in rapida rotazione, su cui è caduto il materiale rimanente della nube e da cui poi si sono formati i pianeti.

La teoria della nebulosa protoplanetaria deve spiegare anche perché i pianeti interni, Mercurio, Venere, Terra e Marte hanno una diversa composizione chimica di quella dei pianeti giganti, Giove, Saturno, Urano e Nettuno. I primi hanno una densità media compresa fra circa 6 e 4 volte la densità dell'acqua, mentre i secondi hanno densità comprese fra 1 e 2 e addirittura Saturno ha densità 0,7, inferiore alla densità dell'acqua. Se ci fosse un oceano abbastanza grande per contenerlo, Saturno galleggerebbe.

Dalle analisi chimiche quantitative del Sole, delle stelle, delle nubi interstellari sappiamo che la composizione chimica dell'universo è molto uniforme e il 90%

degli atomi è idrogeno, il 9% elio e tutti gli altri elementi rappresentano soltanto l'1%, una misera (ma quanto importante!) impurità in un miscuglio di idrogeno ed elio. Questa dunque deve essere stata la composizione chimica della nebulosa protoplanetaria, ben diversa da quella attuale della Terra e dei pianeti terrestri.

Poiché idrogeno ed elio restano allo stato gassoso fino a temperature vicine allo zero assoluto (che corrisponde a –273 gradi centigradi, ed è così detto perché è impossibile raggiungere temperature più basse, perché la velocità d'agitazione termica delle particelle tende a zero, e quindi anche la pressione esercitata dal gas tenderebbe a zero) quasi il 98% della nebulosa protoplanetaria resta gassoso anche nelle parti esterne più fredde. Il carbonio, l'azoto e l'ossigeno che rappresentano il 2% delle impurità si condensano a temperature poco più alte, fra –250 e –240 gradi centigradi. Perciò questi elementi e ghiaccio d'acqua e di anidride carbonica dovrebbero essere abbondanti nelle parti esterne della nebulosa. Tutti gli altri elementi rappresentano meno dello 0,3% delle impurità; i più abbondanti fra questi sono magnesio, silicio, solfo, ferro che reagiscono con l'ossigeno formando ossidi, che restano allo stato solido anche a temperature di 1000 gradi centigradi.

I pianeti terrestri hanno un nucleo centrale metallico coperto da un mantello di silicati, mentre gli elementi volatili sono in percentuale trascurabile, anche perché hanno velocità di agitazione termica quasi eguale o superiore alla velocità di fuga dal pianeta e sono andati evaporando nel mezzo interplanetario. Invece i pianeti giganti sono

composti soprattutto di idrogeno ed elio e, in proporzione minore, di silicati e metalli.

Si può facilmente calcolare che per formare la Terra ci vogliono metalli e silicati pari a circa la massa della Terra. Ma poiché essi rappresentano solo lo 0,0033 della massa della nebulosa, questa per fare la Terra doveva avere massa pari ad almeno 330 volte la massa della Terra; e per fare Mercurio 16 masse terrestri, 330 per Venere e 33 per Marte, in totale circa 700 masse terrestri. Per i pianeti giganti, la cui composizione chimica è simile a quella della nebulosa occorrevano almeno 1000 masse terrestri per Giove, 500 per Saturno, Urano e Nettuno. In totale si stima che la massa della nebulosa protoplanetaria doveva essere almeno di 3000 masse terrestri, cioè circa un centesimo della massa del Sole.

Le prime prove indirette dell'esistenza delle nebulose protoplanetarie si ottennero nel 1983 quando il primo satellite per l'osservazione del cielo nell'infrarosso (radiazioni fra circa 20 e 500 micron di lunghezza d'onda, che vengono in gran parte assorbite dalla nostra atmosfera) notò che almeno una cinquantina di stelle relativamente vicine, emettevano nell'infrarosso molto di più di quanto ci si sarebbe aspettato. Per es. Vega, una delle stelle più brillanti del nostro cielo, di colore bianco, ha un massimo di splendore nell'azzurro-violetto, come ci si aspetta da una stella bianca, che ha una temperatura superficiale di circa 10.000 gradi assoluti, ed inoltre un inaspettato massimo secondario nell'infrarosso, che si spiega con la presenza di un corpo molto

più freddo, meno di 1000 gradi assoluti, ma molto più esteso della stella.

La prima osservazione diretta è stata quella di Beta Pictoris. Occultando l'immagine della stella con un microscopico dischetto opaco per evitare che la sua luce predominante nascondesse i dettagli delle parti circostanti, è stato possibile mettere in evidenza la presenza di un disco esteso circa 670 unità astronomiche (o 17 volte la distanza di Plutone dal Sole). Poi il telescopio spaziale HST e il grande telescopio europeo per l'emisfero australe, situato nel deserto di Atacama sulle Ande cilene hanno ottenuto le immagini di parecchie giovani stelle circondate da anelli di polvere e gas. Dalla quantità di materia espulsa e dalla sua velocità (i cosiddetti venti stellari) si può stimare quanto tempo passa fra l'emergere della stella da questo bozzolo rappresentato dalla nebulosa e la dispersione di quest'ultima nello spazio interstellare; si trova circa 5 milioni di anni, un millesimo dell'età del sistema solare che è 4,6 miliardi di anni. Quindi i pianeti devono essersi formati in meno di 5 milioni di anni, un intervallo di tempo davvero breve in scala astronomica.

Sebbene si abbiano chiare prove dell'esistenza delle nebulose protoplanetarie, il problema è ora di capire come in esse ai formino i pianeti. Come per la formazione delle stelle, anche per la formazione dei pianeti sono importantissime quelle impurità che sono le polveri. Nel loro moto caotico le molecole urtando i grani di polvere facilitano il loro aggregarsi a formare grani più grossi che a causa dei moti turbolenti del gas possono raggiungere dimen-

sioni di qualche centimetro. A questo punto non vengono più influenzati dai moti del gas e tendono a disporsi sul piano equatoriale della nebulosa distribuendosi su orbite ellittiche secondo le leggi kepleriane. Perciò gli agglomerati più interni si muovono più velocemente di quelli più esterni, gli agglomerati più grossi inglobano i più piccoli e possono raggiungere dimensioni di qualche chilometro. Si chiamano planetesimali e sono i veri mattoni che costruiranno i pianeti.

Anche se quando si parla di sistema solare si pensa soprattutto ai pianeti, i pianetini e anche i meteoriti sono molto importanti per trovare l'età del sistema solare e il tempo necessario per la formazione dei pianeti, perché la loro struttura è quella originale, non modificata dai processi geologici che hanno luogo nei loro fratelli maggiori.

I meteoriti sono le briciole lasciate dalla nebulosa protoplanetaria dopo la formazione dei pianeti. L'85% dei meteoriti sono condriti chiamati così perché contengono delle inclusioni sferoidali dette condruli che si ritiene rappresentino il materiale originario. Dall'analisi chimica e dalla composizione isotopica dei condriti si deduce con gran precisione che l'età del sistema solare è 4,6 miliardi di anni. Ricordo cosa significa composizione isotopica: ogni elemento è composto da un miscuglio di atomi aventi lo stesso numero di protoni, carichi positivamente, ed egual numero di elettroni carichi negativamente, che determinano le proprietà chimiche dell'elemento, e da un numero di neutroni diverso da isotopo a isotopo. Quindi uno stesso

elemento è composto di atomi di massa diversa, più o meno stabili. L'isotopo più stabile è di gran lunga il più abbondante. Gli altri possono essere anche molto instabili; dal rapporto delle abbondanze degli isotopi stabili a quelli instabili (cioè radioattivi) si deduce l'età del corpo in cui si trova un dato elemento.

Le percentuali di elementi non volatili contenute nei condriti è identica a quella solare, mentre gli elementi volatili non possono essere trattenuti dalla debole attrazione gravitazionale di questi sassi cosmici. Alcuni condriti contengono inclusioni di rubidio 87, isotopo instabile che decade in stronzio 87 (dove 87 è il peso atomico, costituito dalla somma di protoni e neutroni che costituiscono il nucleo atomico). Dalle inclusioni trovate nel meteorite di Allende, caduto a Pueblito de Allende in Messico nel 1968 si deduce che l'età del sistema solare è 4,560 miliardi di anni. Invece i condriti privi di inclusioni danno un'età di 4,555 miliardi di anni. La differenza di 5 milioni di anni è significativa e sta ad indicare che le inclusioni si sono formate proprio all'inizio dell'addensamento della nube, mentre le condriti si sarebbero formate alla fine della vita della nebulosa. Ma abbiamo visto che 5 milioni di anni è anche il tempo necessario ai venti stellari per disperdere la placenta che racchiude la giovane stella. Quindi per via completamente diversa abbiamo la conferma che i pianeti si formano in un lasso di tempo di pochi milioni di anni.

Se, come sembra probabile, tutti gli elementi non volatili hanno fatto parte di planetesimali, la loro composi-

zione chimica deve variare con la distanza dal Sole: quelli interni sarebbero composti di rocce e metalli, mentre quelli più esterni dovrebbero contenere inclusioni di ghiaccio e gas idrogeno e altri elementi volatili. Se le dimensioni dei planetesimali sono di qualche decina di chilometri, la massa di quelli più interni sarebbe di qualche milione di miliardi di chilogrammi, e perciò per fare una Terra, la cui massa è di 6 milioni di miliardi di miliardi ce ne vorrebbero quasi 10 miliardi. Questa folla di planetesimali si muove su orbite simili e quindi la loro velocità relativa è bassa, gli scontri frequentissimi e questo favorisce l'aggregazione di più planetesimali, e più gli aggregati crescono più cresce la loro attrazione gravitazionale. Probabilmente il processo di aggregazione cessa quando non c'è più materia prima disponibile. Si stima che fra le attuali orbite di Mercurio e Marte ci fosse qualche centinaio di corpi di massa paragonabile a quella di Mercurio e della Luna.

Giove si forma nelle parti più esterne dove si trova la maggior parte della massa della nebulosa composta di idrogeno, elio e tutte le altre impurità. Questa ampia disponibilità di materia fa sì che Giove cresca rapidamente accumulando quasi tutto il gas e perturbando le orbite dei protopianeti terrestri che scontrandosi distruggeranno i più piccoli o magari li spaccheranno in due come potrebbe essere stato il caso per la Terra e la Luna.

Noi siamo abituati a pensare al sistema solare come a qualcosa che è sempre esistito e che sempre esisterà eguale a se stesso. Eppure sappiamo bene che 6 miliardi di anni fa i pianeti non c'erano e non c'era nemmeno il

Sole, che il Sole ha una vita molto lunga ma non eterna, che l'universo stesso è in continua evoluzione. E allora ci domandiamo: è possibile prevedere come cambierà il sistema solare? Quanto stabili sono le orbite dei pianeti? È il problema dei più corpi, estremamente complesso dal punto di vista matematico e risolvibile solo con approssimazioni successive. Grazie ai moderni calcolatori elettronici è possibile fare delle simulazioni numeriche che ci permettono di stabilire con precisione le orbite per i prossimi 10 milioni di anni, ma solo fare una stima grossolana di come cambierà il sistema solare fra 5 miliardi di anni, un tempo eguale alla sua età attuale.

Nei prossimi 15 milioni di anni le perturbazioni che reciprocamente i pianeti apportano alle loro orbite ne modificheranno l'eccentricità. Nel caso della Terra che ha una eccentricità di 0,0167, questa potrebbe oscillare fra 0,06 e 0 (orbita circolare); per Marte la cui attuale eccentricità è 0,093, potrebbe passare da 0,12 a 0 nel giro di un milione di anni; per Mercurio che ha un'orbita marcatamente ellittica (eccentricità 0,206) si avrebbero variazioni irregolari da 0,5 a 0,1, mentre Venere che ha un'orbita quasi perfettamente circolare subirebbe variazioni simili a quelle della Terra. Per i pianeti giganti invece le variazioni sarebbero molto piccole.

Anche considerando intervalli di tempo molto maggiori si trova che l'instabilità del sistema solare non porterebbe variazioni drastiche. Unica eccezione Mercurio che potrebbe collidere con Venere fra circa tre miliardi e mezzo di anni.

Le nostre teorie sulla formazione del sistema solare si basano ovviamente sui dati attuali. La scoperta di più di 200 pianeti extrasolari ci pone però parecchi problemi. La maggioranza di questi sono pianeti grossi come e più di Giove che orbitano molto vicino al loro Sole, con periodi di rivoluzione di pochi giorni. Questo eccesso di 'Giovi' vicini alla stella è dovuto, come vedremo ai metodi impiegati per la loro scoperta, però pone grossi problemi ai nostri modelli teorici, che sembravano escludere la possibilità che i pianeti giganti possano formarsi vicino alla loro stella.

# La scoperta dei pianeti extrasolari

Il fatto che il Sole sia una stella comunissima della nostra Galassia, e inoltre le più recenti osservazioni di numerosi dischi di gas e polveri attorno a stelle di recente formazione, erano argomenti a favore dell'esistenza di altri sistemi planetari. Però il primo pianeta extrasolare, cioè in orbita attorno a una stella diversa dal Sole è stato scoperto soltanto nel settembre 1995 da due astronomi svizzeri – Michel Mayor e Didier Queloz. Nel febbraio 1995 il planetologo Benjamin Zuckerman scriveva: «Oggi la tecnologia è in grado di scoprire pianeti extrasolari grandi come Giove. Poiché finora non ne abbiamo trovato nemmeno uno, vuol dire che sono molto rari». Ma si sbagliava di grosso. Poco più di dieci anni dopo il numero di pianeti extrasolari è salito a quasi 300. Si tratta quasi sempre di pianeti grossi come o più di Giove, il che non significa che non ci siano anche pianeti piccoli come la Terra, ma solo che i nostri mezzi non ci permettono ancora di scoprirli. Ma di nessuno abbiamo ancora osservato il volto. Cioè tutti sono stati scoperti in modo indiretto, per l'effetto che hanno sulla loro stella. Infatti la piccola distanza dalla stella (rispetto alla distanza della stella da noi) e lo splendore predominante di questa rendono estremamente difficile osservarli. Un ipotetico osservatore su Proxima Centauri, a 4,22 anni luce, vedrebbe Giove a 4 secondi d'arco dal Sole e ci vorrebbero strumenti e artifici molto raffinati

per poterlo distinguere dal suo abbagliante grande vicino. Ma la maggioranza delle stelle si trova a distanze molto maggiori. Per una a 100 anni luce la separazione angolare di Giove dal Sole sarebbe di soli 0,17 secondi d'arco.

I metodi che ci hanno permesso di scoprire tutti questi pianeti sono: a) le perturbazioni gravitazionali al moto della stella, di gran lunga il metodo più redditizio; b) il transito del pianeta davanti alla stella, che può verificarsi solo se la nostra visuale giace sul piano orbitale del pianeta; c) l'effetto "lente gravitazionale" del sistema stella+pianeta sulla luce proveniente da una stella più lontana. Anche in questo caso l'effetto avrà luogo se stella lontana, stella+pianeta e osservatore sono perfettamente allineati. Ma vediamo in dettaglio in cosa consistono questi tre metodi.

Il Sole e le stelle relativamente vicine descrivono orbite simili intorno al centro della nostra galassia, la Via Lattea, situato a circa 27.000 anni luce da noi, e compiono un'intera rivoluzione in circa 220 milioni di anni. Perciò il Sole e le stelle nostre vicine si muovono come treni su binari paralleli e le loro velocità relative sono di qualche decina di km/sec. Noi vedremo queste stelle descrivere nel corso di qualche anno dei cammini praticamente rettilinei. Quello che possiamo osservare sono le due componenti dei loro moti: il loro moto proprio sulla volta celeste, in secondi d'arco all'anno, corretto per gli spostamenti apparenti dovuti all'aberrazione della luce e alla parallasse, una quantità, data la grande distanza delle stelle, sempre molto piccola e difficilmente misurabile; e il moto in direzione radiale, cioè nella direzione dell'osservatore. Quest'ultimo

si misura tramite l'effetto Doppler. È noto che quando una sorgente di onde sonore o di onde luminose si avvicina all'osservatore questi riceve onde di frequenza più alta (o onde più corte) di quella emessa dalla sorgente, se invece se ne allontana l'osservatore riceve onde di frequenza più bassa (o onde più lunghe) di quelle emesse. Misurando le posizioni delle righe nello spettro di una stella e lo spostamento rispetto alla posizione che hanno in laboratorio (a riposo rispetto all'osservatore) si determina la velocità radiale in km/sec. Per convenzione si indicano col segno meno le velocità di avvicinamento, righe spostate verso il violetto, e col segno più quelle di allontanamento, righe spostate verso il rosso. Anche in questo caso si tratta di misure delicate, perché una velocità di 10 km/sec produce spostamenti delle righe dell'ordine del decimo di Angstrom e solo con tecniche molto raffinate è possibile oggi misurare anche velocità dell'ordine di qualche metro al secondo. Con questo tipo di misure si è notato che alcune stelle invece di avere una velocità costante di qualche decina di km/sec rispetto al Sole, mostravano delle oscillazioni periodiche in più e in meno di qualche metro al secondo, che stanno a indicare la presenza di un corpo che con la sua attrazione gravitazionale disturba il moto della stella. L'ampiezza dell'oscillazione ci permette di derivare la massa del corpo perturbante mentre la periodicità delle oscillazioni ci da il periodo di rivoluzione.

Ci sono molte coppie di stelle doppie la cui duplicità è stata scoperta con questo metodo. Ma allora come stabilire se il corpo perturbante è una stella o un pianeta?

Una stella per dirsi tale deve avere una massa di almeno 8 centesimi della massa del Sole, altrimenti non arriva ad innescare le reazioni nucleari che sono la fonte dell'energia che essa irradia. Più precisamente oggetti con masse inferiori a 10 volte la massa di Giove sono definiti pianeti e si suppone che il loro modo di formazione avvenga tramite l'aggregazione di planetesimali. Fra 10 volte la massa di Giove (o un centesimo della massa del Sole) e 8 centesimi della massa solare si parla di Nane brune, cioè di corpi gassosi che si formano come le stelle ma non raggiungono la massa critica per innescare le reazioni nucleari.

È evidente che con questo metodo sarà favorita la scoperta di pianeti grossi e orbitanti molto vicino alla loro stella: infatti il primo pianeta scoperto in orbita attorno a 51 Pegasi aveva una massa paragonabile a quella di Giove ma un periodo di rivoluzione di poco più di 4 giorni, e quindi orbita attorno alla sua stella a una distanza circa 8 volte più piccola di quella di Mercurio dal Sole.

Un ipotetico osservatore abitante un pianeta extrasolare che disponga delle nostre tecnologie e che osservi la velocità radiale del nostro Sole, vedrebbe che essa oscilla attorno a un valore medio di circa più o meno 10 metri al secondo con un periodo di circa 12 anni. Ciò significa che la velocità del Sole nella direzione Sole-osservatore aumenta e diminuisce periodicamente di circa 10 metri al secondo con un periodo di 12 anni. L'ampiezza delle oscillazioni cambia pure periodicamente. Se il nostro osservatore conosce la meccanica celeste capirà che il moto

del Sole è disturbato dall'attrazione gravitazionale predominante di un corpo – Giove, con periodo di rivoluzione di 11,86 anni – ma le variazioni di ampiezza delle oscillazioni indicano la presenza di un altro corpo più piccolo e più lontano dal Sole, Saturno, il cui periodo di rivoluzione è 29,46 anni. L'effetto dovuto a tutti gli altri pianeti è troppo piccolo per poter essere rilevato.

Se siamo tanto fortunati da scoprire una stella con un pianeta il cui piano orbitale contiene la nostra visuale, ogni volta che il pianeta passa davanti alla stella porta via una piccola quantità di luce, qualche centesimo o anche meno della luce stellare, comunque misurabile. Si tratta di una mini-eclisse, un fenomeno ben noto anche nel sistema solare, quando si ha un transito di Mercurio o di Venere davanti al disco solare. Con questo metodo si sono scoperti una decina di pianeti.

L'ultimo metodo, detto delle microlenti gravitazionali, è una conseguenza della relatività generale. Einstein aveva predetto che anche la luce è soggetta alla forza di gravità. Pertanto un fascio di luce proveniente da una lontana galassia, passando vicino ad un'altra galassia situata fra quella nello sfondo e noi che fungerà da galassia lente, subirà una deviazione dei raggi che la galassia lente focheggerà come farebbe una lente ottica, dando delle immagini virtuali della galassia più lontana. Questa previsione ha trovato numerose conferme osservative. Ma anche una stella o addirittura un pianeta possono fungere da lenti, o meglio da microlenti. Con questo metodo si possono rivelare pianeti anche molto lontani, addirittura

situati in altre galassie. Quando la luce proveniente da una stella nello sfondo passa dietro quella di una stella più vicina a noi, questa agisce come una lente e intensifica la luce della stella lontana. Poiché stella lontana, stella microlente e osservatore sono tutti in moto relativo l'uno rispetto all'altro, l'intensificazione dura solo alcuni giorni, ed è questo tipo di variazione luminosa che permette di stabilire che si tratta di effetto lente gravitazionale. Se la stella microlente è accompagnata da un pianeta anch'esso fungerà da micro-microlente e produrrà anch'esso un'intensificazione minore della luce della stella nello sfondo per una durata ancora più breve. Con questo metodo, osservando in modo automatico qualche milione di stelle, si sono scoperti quattro casi. L'intensificazione – da due a tre volte – della luce delle stelle sullo sfondo, dura qualche diecina di giorni per l'effetto lente dovuto alla stella e solo uno o due giorni per l'effetto lente dovuto al pianeta. In quest'ultimo caso l'intensificazione è circa una decina di volte più piccola.

Solo nel 2007 è stata annunciata la scoperta del primo pianeta extrasolare simile alla Terra, con caratteristiche tali che potrebbe anche essere adatto ad ospitare forme di vita. Esso orbita attorno a una nana rossa Gliese 581, distante soli 20 anni luce da noi. Gliese 581 è una stella più piccola e più fredda del Sole, circa 50 volte meno splendente, una temperatura superficiale di circa 3000 gradi, e che perciò appare di colore rossastro, in confronto col Sole, che con la sua temperatura superficiale di 5700 gradi è di colore giallastro. Già nel 2005 si era scoperto un primo pianeta

attorno a Gliese 581, con una massa circa 20 volte quella della Terra, distante dalla stella solo 6 milioni di chilometri – una distanza circa 10 volte più piccola di quella di Mercurio dal Sole e periodo di rivoluzione di 5 giorni e mezzo. A causa della forte attrazione gravitazionale questo pianeta probabilmente rivolgerà sempre la stessa faccia verso la stella (come succede alla Luna con la Terra) e la sua temperatura sull'emisfero illuminato potrebbe essere superiore ai 100 gradi centigradi, mentre sull'emisfero in ombra sarebbe intorno a –100 gradi centigradi. Il secondo pianeta, quello scoperto nel 2007, ha dimensioni una volta e mezzo quella della Terra e una massa cinque volte maggiore. La sua densità prova che debba essere costituito di materiale roccioso e metalli ferrosi. La sua distanza dalla stella è di 11 milioni di chilometri e il periodo di rivoluzione di 13 giorni. Si può stimare che la sua temperatura vari fra 0 e 40 gradi centigradi, valori cioè che rendono possibile la presenza di acqua allo stato liquido; questa è una condizione che si ritiene indispensabile per lo sviluppo di forme di vita.

Ci sono anche indizi della presenza di un terzo pianeta, con massa circa 8 volte quelle della Terra.

La scoperta di questo sistema planetario è stata fatta da un gruppo di astronomi europei con il telescopio da 3,6 metri di diametro dell'osservatorio europeo dell'emisfero australe situato a La Silla, sulle Ande cilene, utilizzando un sofisticato spettrometro per la misura delle velocità radiali.

Aspettiamo ora di poter finalmente osservare direttamente qualche pianeta extrasolare. Questo dovrebbe esse-

re possibile quando sarà realizzato un importante progetto europeo: la costruzione di un telescopio da 50 metri di diametro, che è stato battezzato OWL, un acronimo per Overwhelming Large Telescope, telescopio eccezionalmente grande, ma che significa anche gufo, o civetta, o comunque uccello notturno dalla vista acutissima. Quando sarà possibile osservare direttamente l'immagine di un pianeta, potremo anche prendere lo spettro della luce stellare riflessa dalla sua superficie e capire se in questo spettro ci sono assorbimenti dovuti all'eventuale atmosfera del pianeta e determinarne la composizione chimica, scoprire fra l'altro la presenza o meno di ossigeno, vapor acqueo, anidride carbonica ecc.

La scoperta di tanti pianeti gassosi vicini alla loro stella è in contrasto con le nostre teorie sul sistema solare. Non si capisce per es. come un pianeta gigante possa trattenere la sua enorme atmosfera gassosa trovandosi così vicino alla stella. Alcuni ipotizzano che questi "Giovi" si siano formati nelle parti più esterne e poi siano emigrati verso l'interno del sistema. Molti di questi pianeti hanno orbite molto allungate e forse a ciò è dovuta l'instabilità che li porterebbe a emigrare.

# Alla ricerca di ET

La conferma da parte delle osservazioni di così numerosi pianeti extrasolari ha riportato di grande attualità un interrogativo che l'umanità si è posta fino dai tempi più remoti: siamo soli nell'universo? ci sono altre terre come la nostra, come la nostra popolate da esseri intelligenti?

Se lo chiedeva Talete (VII-VI secolo a.C.) quando pensava che le stelle fossero fatte della stessa materia di cui è fatta la Terra, lo pensava Anassagora (496-428 a.C.) che riteneva che i semi della vita fossero sparsi ovunque nell'universo; Epicuro (341-270 a.C.) come secoli dopo Giordano Bruno era convinto dell'esistenza di infiniti mondi, Metrodoro (330-277 a.C.) sosteneva che come in un campo seminato a grano è impossibile che nasca una sola pianta, così è impossibile ci sia una sola Terra abitata. Lucrezio Caro in *De rerum natura* (libro II, 1058-1077) scrive:

> [...] Questo mondo è opera della natura, / e i corpuscoli urtandosi a caso per forza spontanea, / variamente, senza ordine o frutto, e invano addensati, / riuscirono infine a formare a un tratto quei nuovi aggregati / che divenissero per sempre la base delle grandi sostanze, / la terra il mare, il cielo, le specie viventi. / Perciò è sempre più necessario che tu riconosca / che esistono altrove nell'universo altre unioni di corpi materiali, / come è questa che l'etere cinge di un avido amplesso. / Quando inoltre vi è molta materia approntata, / quando si offre uno spazio, né cosa né causa

> si oppone, / è evidente che i corpi si formano e compiono il loro sviluppo. / E ora se il numero degli atomi è così sterminato / che un'intera età dei viventi non basterebbe a contarli, / e persiste la medesima forza e natura che possa / congiungere gli atomi dovunque nella stessa maniera / in cui si congiunsero qui, è necessario per te riconoscere / che esistono altrove nel vuoto altri globi terrestri / e diverse razze di uomini e specie di fiere.

Venendo a tempi più vicini a noi, Giordano Bruno si dichiara convinto che le stelle siano altrettanti soli e come il sole circondate da pianeti, e questi siano a loro volta abitati come la Terra. Per queste eresie ricordiamo ancora che fu mandato al rogo nel febbraio 1600. Quasi un secolo dopo Bernard Le Bovier de Fontenelle (1657-1757) nel 1686 scrive *Entretiens sur la pluralité des mondes* in cui immagina una serie di dialoghi con una ipotetica Marchesa, completamente digiuna di fisica, ma in grado di capire le sue spiegazioni e i suoi ragionamenti e anche di controbatterli.

Camille Flammarion (1842-1925) grande divulgatore dell'astronomia scrisse ben tre volumi sulla possibilità di vita extraterrestre: *La pluralité des mondes habités* nel 1862, *Les Terres du ciel* nel 1877 e *La planète Mars et ses conditions d'habitabilité* nel 1892. Certamente Flammarion si dedicò a scrivere questi libri anche perché proprio in quegli anni si verificarono due grandi opposizioni di Marte, cioè Marte si trovò alla minima distanza dalla Terra nel 1877-79 e nel 1881. In queste occasioni Giovanni Schiaparelli si dedicò a molte e accuratissime osservazioni di Marte. Sebbene

utilizzasse uno dei migliori telescopi disponibili allora, un rifrattore ancora oggi impiegato per scopi didattici e divulgativi nella sede osservativa dell'Osservatorio di Brera, le immagini del pianeta, disturbate sia dalla nostra che dall'atmosfera marziana, e l'insufficiente potere risolutivo dello strumento, mostravano macchie indistinte, che a Schiaparelli sembravano dei canali. In realtà Schiaparelli non disse mai chiaramente se pensava si trattasse di canali artificiali, opera di civiltà avanzate, oppure di canali naturali, ma la notizia fu ripresa da giornali di tutto il mondo, e quelli americani e inglesi tradussero il termina canali con *canals*, che significa canali artificiali (ad es. Panama canal) invece che con *channel* che significa canali naturali; infatti The Channel per gli inglesi è La Manica. Fu così che si diffuse l'idea che su Marte vivesse o avesse vissuto una popolazione di ingegneri, capaci di costruire una rete di canali per distribuire l'acqua dei poli a tutto il pianeta. L'italiano Vincenzo Cerulli e l'inglese E. W. Maunder ebbero il coraggio di andare controcorrente e sostennero che i canali erano illusioni ottiche, come quelle che capitano quando nelle nuvole o nelle macchie d'umido su un muro vediamo delle teste umane o delle immagini di animali. Il fenomeno si è ripetuto anche nella nostra era spaziale. Le immagini date dalle prime sonde mostravano una figura che somigliava a una gigantesca testa umana. Fu chiamata La Sfinge e molti appassionati di fantascienza e di ufologia volevano vederci un'opera artificiale, testimone di una grande civiltà ormai estinta. Solo le sonde più recenti, capaci di risolvere dettagli molto più

fini, mostrarono senza ombra di dubbio che si trattava di un gioco di luci e ombre.

Comunque non si può escludere che su Marte ci siano state e forse ci siano ancora delle forme di vita molto elementari. Infatti la struttura geologica della superficie marziana suggerisce che in passato ci sia stata molta acqua; acqua ghiacciata si trova ancora oggi ai poli e probabilmente nel sottosuolo potrebbe esserci acqua allo stato liquido: e si ritiene che la presenza di acqua sia necessaria alla vita. Inoltre la rarefatta atmosfera marziana produce comunque un leggero effetto serra per cui la temperatura pur avendo forti oscillazioni, da –90 a +20 gradi centigradi è sopportabile per un organismo vivente: non si raggiungono gli estremi di Luna e Mercurio, privi di atmosfere, che vanno sotto –100 nella parte in ombra e superano i +100 gradi centigradi nella parte illuminata dal Sole. Inoltre Marte ha un periodo di rotazione e un'inclinazione dell'equatore sul piano dell'orbita quasi eguali a quelli terrestri per cui su Marte il giorno e la notte si alternano come sulla Terra e come sulla Terra ci sono le stagioni. D'altra parte organismi viventi elementari sono stati scoperti nelle profondità oceaniche vicino a sorgenti di acqua a temperatura di +100 gradi centigradi e pressione di 90 atmosfere, come pure sotto i ghiacci dell'Antartide a temperature inferiori a –100 gradi centigradi, e dove non arriva mai la luce del Sole. Perciò non si può escludere che forme di vita possano essersi sviluppate anche negli oceani che secondo le osservazioni delle sonde spaziali sarebbero presenti sotto la superficie di Europa,

uno dei grandi satelliti di Giove e forse su Titano, il più grande satellite di Saturno e l'oggetto più lontano su cui sia atterrata una navicella, la Huygens. Si pensa a possibile vita su Titano perché ha un'atmosfera ricca di molecole organiche, che sono i mattoni della vita, e fiumi e laghi di metano liquido. Chissà, forse la vita potrebbe svilupparsi anche in un liquido diverso dall'acqua.

Comunque la maggior curiosità riguarda la probabilità di forme di vita elevate e si sta sviluppando una scienza – l'astrobiologia – che cerca di immaginare le condizioni necessarie per lo sviluppo della vita e la sua evoluzione verso esseri intelligenti. È una navigazione nell'oscurità; infatti non sappiamo nemmeno come si sia originata la vita sulla Terra, e quindi è difficile stabilire se tutte le stesse condizioni che abbiamo sulla Terra siano necessarie per l'evoluzione verso forme di vita elevate; non sappiamo se altri esseri intelligenti devono necessariamente essere simili a noi o anche completamente diversi. Da quasi mezzo secolo cerchiamo un contatto con eventuali civiltà tecnologicamente avanzate tramite il progetto SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence), per ora senza successo, ma, come affermano i sostenitori di questo progetto «la probabilità di successo è molto bassa, ma se non si tenta la probabilità diventa zero».

Per prima cosa domandiamoci: cosa distingue il vivente dal non vivente? La risposta è: la capacità di autoriprodursi, di evolvere, di subire mutazioni, la disponibilità di un gran numero di informazioni e la capacità di autoregolarsi per far fronte ai vincoli posti dall'ambiente.

Poi ci chiediamo: cosa sappiamo sull'origine della vita sulla Terra? Purtroppo non c'è nessun testimone che possa raccontarcelo, e possiamo solo fare delle ipotesi.

Ci domandiamo se è stato un evento straordinario, improbabile o un evento spontaneo regolato da leggi naturali, che può sempre ripetersi se sussistono determinate condizioni fisiche.

Dalle osservazioni del suolo lunare sappiamo che la Luna e quindi anche la Terra sono state sottoposte a un continuo intenso bombardamento da parte di meteoriti almeno fino a 3,8 miliardi di anni fa, incompatibile con lo sviluppo della vita. Il più antico microfossile somigliante ad un batterio, trovato in Sud Africa, risale a 3,5 miliardi di anni fa, mentre le più antiche tracce di alghe unicellulari risalgono a 2,5 miliardi di anni fa, ed i primi organismi pluricellulari risalgono a 800 milioni di anni fa.

La Terra primordiale era un ambiente molto poco ospitale, un terreno desertico con numerosi vulcani, coperto di lava e un'atmosfera per noi irrespirabile e simile a quella di Venere e Marte, composta di idrogeno, azoto, ammoniaca, metano, vapor acqueo, anidride solforosa, monossido di carbonio, anidride carbonica e solo tracce di ossigeno.

Quindi l'atmosfera primitiva della Terra conteneva quantità trascurabili di ossigeno libero, era un'atmosfera riducente, o almeno non ossidante. Dopo la comparsa della vita si è trasformata in atmosfera ossidante; ci sono stati processi che hanno liberato grandi quantità di ossigeno.

L'atmosfera si è formata sia per la caduta degli ultimi planetesimali che contenevano ghiaccio d'acqua, di ammoniaca, e di metano, sia per degassamento della Terra stessa. Alle alte temperature prodotte dal magma incandescente dovuto all'attività vulcanica i ghiacci evaporavano formando un'atmosfera prevalentemente composta di vapor acqueo, ammoniaca e metano. Circa 4,6 miliardi di anni fa la crosta terrestre si consolida e si ha una grande attività vulcanica. Alle alte temperature prodotte dal magma incandescente acqua e metano reagiscono fra loro producendo monossido di carbonio, anidride carbonica e idrogeno molecolare; quest'ultimo sfugge all'attrazione gravitazionale della Terra.

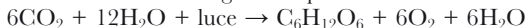
Quando è cambiata la composizione dell'atmosfera terrestre? Ce lo spiega Mario Ageno nella sua opera *Dal non vivente al vivente* (Theoria, Roma-Napoli 1991). Lo ricaviamo dal confronto fra la composizione chimica delle rocce ignee e quella dei materiali prodotti dalla loro erosione da parte degli agenti atmosferici. Se l'erosione delle rocce ignee e la sedimentazione hanno luogo in atmosfera ricca di ossigeno libero, tutti i prodotti dell'erosione vengono ossidati, e nei sedimenti si trova biossido di silicio (silice o quarzo) ed ematite ($Fe_2O_3$). Se invece l'erosione delle rocce ignee avviene in atmosfera riducente, la composizione chimica del sedimento è eguale a quella delle rocce. L'epoca in cui ha avuto luogo la sedimentazione la si stabilisce dai granuli di sostanze radioattive rimaste occluse nei sedimenti. Si è così visto che esistono sedimenti formatisi sia in atmosfera riducente che in atmosfera ossidante. I

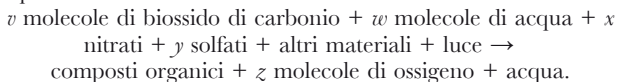
più antichi, chiaramente formatisi in atmosfera riducente hanno età variabili ma sempre anteriore a 1,8 miliardi di anni fa; si può concludere che l'atmosfera ricca di ossigeno libero si è formata fra 1,8 e 1,4 miliardi di anni fa[1].

La vita non può essere comparsa in un'atmosfera come la nostra attuale, perché la grande quantità di ossigeno libero favorirebbe la rapida formazione di anidride carbonica e di carbonati inorganici e impedirebbe il formarsi di grandi quantità di composti organici, necessari per l'evoluzione verso semplici organismi viventi. Quindi la vita dovrebbe essere apparsa prima di 1,8 miliardi di anni fa, quando l'atmosfera era ancora riducente. In terreni del Sud Africa di età pari a circa 3,3 miliardi di anni sono state trovate delle sostanze chimiche che vengono sintetizzate solo negli organismi viventi, e che perciò potrebbero essere la prova che già allora c'erano forme di vita.

[1] Fotosintesi: significa alla lettera mettere insieme (sintetizzare) con l'energia della luce. Nelle piante verdi l'energia luminosa è catturata e usata per trasformare l'acqua, l'anidride carbonica e minerali in ossigeno e composti organici. Senza la fotosintesi l'atmosfera terrestre sarebbe priva di ossigeno.

Esempio di come si forma il glucosio per fotosintesi:

$$6CO_2 + 12H_2O + \text{luce} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

Non si formano solo carboidrati, come si pensava, ma anche aminoacidi, proteine, lipidi, pigmenti. I minerali forniscono gli elementi (azoto, fosforo, zolfo) necessari. Un'equazione generalizzata che rappresenta tutti i processi fotosintetici è data da:

*v* molecole di biossido di carbonio + *w* molecole di acqua + *x* nitrati + *y* solfati + altri materiali + luce →
composti organici + *z* molecole di ossigeno + acqua.

Da vari altri indizi si può concludere che la vita era già presente circa 3,8 miliardi di anni fa, quindi potrebbe essere apparsa sulla Terra soli 800 milioni di anni dopo la sua formazione.

Si suppone che sotto l'azione della radiazione solare e dei fulmini i gas presenti nell'atmosfera abbiano formato gli amminoacidi. Se ne conosce più di un'ottantina in natura ma solo venti di questi sono i mattoni da cui si formano le proteine. Queste muovendosi nel brodo caldo costituito dagli oceani primordiali si incontrano e si scontrano dando luogo a molecole sempre più complesse capaci di autoreplicarsi fino a dar luogo ai primi esseri monocellulari. È la teoria dell'abiogenesi: dal non vivente al vivente.

Che questo ipotetico quadro sull'origine delle prime forme di vita sia attendibile lo prova un bellissimo esperimento fatto nel 1953 da Stanley Miller e perfettamente replicabile. In un'ampolla mise un gas di composizione simile a quello che si ritiene costituisse l'atmosfera primitiva della Terra e per simulare l'energia fornita dai fulmini lo bombardò con scariche elettriche. Dopo una settimana nel fondo dell'ampolla si erano formati degli aminoacidi. Se questi sono stati ottenuti in così breve tempo e in un volume così piccolo come quello di un'ampolla da laboratorio, è possibile immaginare che negli oceani primordiali in tempi che si contano a milioni di anni, dagli aminoacidi si siano formate molecole di proteine e di DNA, che insieme danno origine a un virus.

L'altra ipotesi sull'origine della vita è la panspermia. La panspermia suppone che la vita venga dallo spazio, che

microrganismi vengano portati sulla Terra dai meteoriti o dalle comete. Non è facile capire come questi sopravvivrebbero alle temperature prossime allo zero assoluto degli spazi interstellari e alla radiazione ultravioletta delle stelle, e in ogni caso il problema sull'origine della vita viene solo rimandato: come si è formata la vita sui meteoriti o sulle comete, o addirittura negli spazi interstellari? Molto più credibile è l'abiogenesi. Secondo questa ipotesi, la vita sarebbe il prodotto naturale dell'evoluzione della materia. A. I. Oparin nel suo libro *The Origins of Life* (Dover, New York 1953) affermava proprio che l'emergere della vita è una manifestazione probabile delle leggi della natura.

# Come si è evoluta la vita sulla Terra?

Le più antiche tracce di vita che conosciamo sono le stromatoliti, formate dalle secrezioni di microscopiche alghe monocellulari procariotiche, risalenti a 3,5 miliardi di anni fa (i procarioti sono cellule prive di nucleo come i batteri). Fino a due miliardi di anni fa sulla Terra si trovano solo questi semplici organismi monocellulari procariotici. 1,4 miliardi di anni fa troviamo i più antichi organismi monocellulari eucariotici, cioè cellule con nucleo come le alghe unicellulari. Sono eucarioti i protozoi e tutti gli organismi pluricellulari. I più antichi organismi pluricellulari risalgono a circa un miliardo di anni fa, e i più antichi organismi dotati di scheletri o di parti dure come le conchiglie risalgono a 600 milioni di anni fa: i più antichi esseri viventi sulle terre emerse risalgono a 420 milioni di anni fa, quando la pressione parziale dell'ossigeno atmosferico da un centesimo è salita a un decimo della pressione attuale. Prima di allora la vita si trovava solo nei caldi oceani primordiali, probabilmente vicino alla terra ferma, a profondità superiore a circa 10 metri perché l'acqua avrebbe assorbito la radiazione ultravioletta solare che avrebbe distrutto le macromolecole, ma non a profondità molto maggiori perché altrimenti non avrebbe avuto luogo la fotosintesi per completa assenza di luce.

Oggi siamo in grado di stabilire che fra 4,5 miliardi e 3,8 miliardi di anni fa la Terra è stata sottoposta a un intenso bombardamento meteoritico che ha caratterizzato la fase di formazione dei pianeti e che ha reso praticamente impossibile lo svilupparsi della vita. Questa avrebbe perciò potuto cominciare a svilupparsi solo dopo, sebbene anche in tempi molto più recenti ci siano stati episodi catastrofici come quello verificatosi 65 milioni di anni fa e a cui si attribuisce la scomparsa dei dinosauri. Ma come è stato possibile stabilire la durata e l'entità del bombardamento che ha accompagnato la formazione e lo sviluppo del nostro pianeta? Sono state fondamentali le serie di missioni Apollo che hanno portato gli astronauti sulla Luna. Sia la Luna che la Terra sono state sottoposte a bombardamento da parte di oggetti con diametri anche di qualche decina di chilometri. I crateri di impatto sono rimasti inalterati sul suolo lunare mentre sulla Terra sono stati erosi dai venti e dalle precipitazioni atmosferiche. Quando un cratere si forma sopra ad un altro è evidente che è quello più recente. Perciò dalla stratigrafia e dalle dimensioni dei crateri è stato possibile stabilire le loro età relative. L'età precisa è stata invece calcolata utilizzando elementi radioattivi presenti nei campioni raccolti dagli astronauti in varie zone della Luna. Poiché la Terra ha una massa 81 volte quella della Luna si può calcolare quanti più meteoriti sono caduti sul nostro pianeta. Si trova che fra 4,5 miliardi e 3,8 miliardi di anni fa gli oggetti di diametro compreso fra circa un metro e trenta chilometri decrescono molto rapidamente, poi segue una

decrescita molto più lenta da tre miliardi di anni fa fino ai giorni nostri. Prima di quattro miliardi e venticinque milioni di anni fa erano frequenti i bombardamenti da parte di oggetti molto grandi, anche 500 km di diametro, asteroidi piuttosto che meteoriti, e fino a tre miliardi e ottocento milioni di anni fa era frequente la caduta di oggetti fino a 100 km di diametro. Ciascuno di quelli da 500 km di diametro avrebbe fatto evaporare completamente gli oceani, mentre quelli da 100 km avrebbero fatto evaporare gli strati superficiali, fino a una profondità di circa 200 metri, dove ancora penetra un po' di luce solare e dove avrebbe potuto sbocciare la vita.

Perciò è difficile pensare che la vita possa essere apparsa prima di 3,8 miliardi di anni fa.

Si pensi che il meteorite caduto 65 milioni di anni fa e a cui si attribuisce la scomparsa dei dinosauri avrebbe avuto un diametro di circa 10 km soltanto.

L'aumento dell'ossigeno prodotto dalla fotosintesi ha probabilmente permesso la formazione di uno strato di ozono, molecola composta da tre atomi di ossigeno, efficace assorbente della radiazione ultravioletta solare, e queste condizioni più favorevoli agli esseri viventi probabilmente spiegano l'esplosione di una gran quantità di forme di vita avvenuta nel periodo cambriano[1], come spugne, vermi,

[1] Ere geologiche:
precambriano da 4,6 miliardi a 570 milioni di anni fa;
paleozoico: fino a 225 milioni di anni fa; il periodo cambriano è la più antica divisione dell'era paleozoica e va da circa 570 a 500 milioni di anni fa ed è il periodo in cui si assiste all'esplosione della vita;

insetti, polpi, e anche cordati che includono i rettili, i pesci, gli uccelli e anche i mammiferi. Si ritiene che l'evoluzione dei mammiferi su su fino a noi sia stata resa possibile da un casuale evento catastrofico, la caduta di un grosso meteorite di 65 milioni di anni fa che avrebbe causato l'estinzione dei dinosauri.

Dallo studio delle numerosissime e svariate forme di vita, sia fossili che viventi, presenti sul nostro pianeta, quello che colpisce è la loro evidente origine comune. Il nostro comune antenato è una semplice cellula procariotica – un organismo monocellulare il cui materiale genetico non è racchiuso da una membrana. È stato chiamato LUCA, un acronimo che significa Last Universal Common Ancestor. Tutti gli esseri viventi, dai più semplici ai più complessi, sono fatti di cellule e queste hanno tutte circa la stessa struttura, sono composte dalle stesse macromolecole, gli acidi nucleici e le proteine; fra questi l'acido desossiribonucleico, che è il DNA contenente tutte le informazioni genetiche di un dato individuo. LUCA potrebbe essere paragonato al tronco di un albero che presenta alcune ramificazioni, le quali a loro volta ne presentano altre e queste ancora altre e così via, dall'organismo iniziale alle innumerevoli varietà presenti oggi sulla Terra.

Una domanda che rasenta la fantascienza è: Come potrebbero essere gli ET? Eppure è una domanda a cui

mesozoico: fino a 65 milioni di anni fa;
cenozoico: fino ad oggi.

molti seri scienziati, soprattutto biologi, tentano di rispondere.

Secondo alcuni non dovrebbero essere troppo diversi da noi. Per es. dovrebbero avere qualcosa di simile alle mani, necessarie per costruire utensili. Sappiamo che i delfini hanno cervelli molto sviluppati, intelligenze paragonabili a quella delle grandi scimmie, ma la mancanza di mani impedisce loro di costruire degli utensili e quindi ogni forma di evoluzione tecnologica.

Probabilmente due occhi non solo per vedere ma anche stimare la distanza degli oggetti e probabilmente anche un massimo di sensibilità a quelle lunghezze d'onda a cui il loro sole ha il massimo irraggiamento. Per es. noi abbiamo un massimo di sensibilità al giallo-verde, cioè a lunghezze d'onda fra circa 0,55 e 0,6 micron che è anche l'intervallo di massimo irraggiamento da parte del Sole. È probabile che gli abitanti di un pianeta il cui sole sia una stella più fredda del Sole con un massimo di irraggiamento nel rosso a circa 0,7 micron di lunghezza d'onda, avrebbero occhi con un massimo di sensibilità nel rosso.

Gli scrittori di fantascienza si sono sbizzarriti a immaginare l'aspetto degli extraterrestri, ma la natura forse è stata ancora più fantasiosa: pensiamo alle straordinarie varietà di esseri che possiamo incontrare per es. nelle profondità oceaniche oppure nel mondo degli insetti.

# Il progetto SETI

Sempre nei racconti di fantascienza si favoleggia di incontri con extraterrestri, di viaggi da un sistema solare all'altro, di un linguaggio comune che dovrebbe essere quello della matematica.

Sebbene la scoperta di tanti pianeti extrasolari in poco più di dieci anni, ci dica che l'universo è popolato non solo da centinaia di miliardi di galassie, ciascuna formata da decine, o centinaia o anche migliaia di miliardi di stelle, ma anche da miliardi di miliardi di pianeti, questi resteranno probabilmente irraggiungibili. Infatti, anche limitandosi alla nostra Via Lattea, le distanze sono di decine, centinaia, migliaia di anni luce. La velocità della luce – 300.000 km al secondo, pari a poco più di un miliardo di km/ora (1,08 miliardi all'ora) – è un limite insuperabile. Anche ammesso che si possa riuscire a viaggiare a una velocità di un centesimo di quella della luce, per raggiungere un pianeta situato a 100 anni luce da noi impiegheremmo un tempo cento volte più lungo di quello impiegato dalla luce – diecimila anni. Un tempo lunghissimo rispetto alla vita umana, 10.000 anni fa cominciavano appena ad emergere le più antiche civiltà; e anche se riuscissimo a viaggiare a un decimo della velocità della luce impiegheremmo mille anni, e pensiamo a come è cambiata la vita sulla Terra dal medioevo ad oggi. Solo viaggiando a velocità di 0,9 quelle della luce non solo la durata del viaggio misurata sulla Terra sarebbe di 111

anni ma diventerebbero apprezzabili gli effetti relativistici e per gli astronauti sarebbero passati solo 35 anni.

Allora potremo mai sapere se esistono altre forme di vita intelligenti con cui sia possibile comunicare? Questa domanda se la posero mezzo secolo fa due fisici, l'americano Phil Morrison e l'italiano Giuseppe Cocconi. Essi pensarono che se esistevano altre civiltà che avessero più o meno le nostre stesse curiosità, e un grado di evoluzione tecnologica paragonabile o superiore alla nostra, avrebbero avuto anche conoscenze astronomiche come o superiori alle nostre. Avrebbero quindi esplorato l'universo misurando le radiazioni elettromagnetiche emesse dai corpi celesti e la loro attenzione si sarebbe rivolta soprattutto alla lunghezza d'onda di 21 cm, che è la radiazione emessa dagli atomi di idrogeno neutro presenti nel mezzo interstellare della nostra e delle altre galassie. Per intavolare un dialogo con altre civiltà avrebbero dunque scelto di inviare segnali elettromagnetici, che viaggiando alla velocità della luce sono i messaggeri più veloci possibili, e avrebbero usato una lunghezza d'onda particolarmente interessante per gli scienziati, la 21 cm che è il più efficace modo per scandagliare la struttura della galassia. Perché i loro ipotetici ascoltatori capissero che si trattava di un segnale artificiale e non naturale avrebbero dovuto usare particolari accorgimenti: trasmettere su una banda molto stretta (qualche hertz) centrata a 21 cm, mentre le emissioni naturali sono a banda assai larga (migliaia di hertz) a causa dei moti delle varie regioni emittenti che avendo diverse velocità rispetto a noi sono soggette all'effetto Doppler;

inoltre inviare segnali ripetuti con una cadenza regolare, una specie di alfabeto Morse. Un giovane radioastronomo americano, Frank Drake si propose di cercare di misurare eventuali segnali radio da intelligenze extraterrestri e così nel 1959 ebbe inizio a Green Bank nel West Virginia la preparazione per l'ascolto col radiotelescopio da 24 metri di diametro del radio osservatorio nazionale americano. Proprio in quegli anni il direttore dell'osservatorio di Green Bank era Otto Struve, un famoso astrofisico di origine russa e discendente di una famiglia di astronomi. Otto Struve era uno spettroscopista e si era sempre occupato di fisica e evoluzione stellare; durante la rivoluzione russa era fuggito negli Stati Uniti e aveva diretto il dipartimento di astronomia dell'Università di Berkeley in California fino al 1959. Ho avuto la fortuna di lavorare per quasi due anni a Berkeley e poter discutere con lui di molti problemi, visto soprattutto che avevamo comuni interessi scientifici, e cioè lo studio delle stelle binarie interagenti, delle loro peculiarità e del loro cammino evolutivo. Nel 1959 gli fu offerta la direzione del nuovo osservatorio radioastronomico di Green Bank, e accettò, a 60 anni passati, di cambiare completamente campo di ricerca. Era persona di larghe vedute, profondamente democratico e così incoraggiò il giovane Drake a iniziare una ricerca che molti consideravano una pazzia. Ma come avevano dichiarato Cocconi e Morrison, la probabilità di successo è molto bassa, ma se non si tenta, la probabilità è certamente zero.

Nel 1961, su invito di Struve, mi trovavo anch'io a Green Bank e ricordo questo grande orecchio puntato

verso Tau Ceti, una stella più debole del Sole, a soli 12 anni luce da noi. Green Bank è un luogo abbastanza desolato, dove gli unici abitanti sono i ricercatori e tecnici dell'Osservatorio e separati da meno di un chilometro, gli abitanti di un minuscolo paese di una ventina di casette allineate lungo la strada. Una strada percorsa da rare macchine e malgrado fosse la fine di agosto e il caldo umido soffocante, nessun essere vivente in giro, né a due né a quattro zampe, solo ricordo un serpente morto, forse schiacciato da una macchina, e qualche tendina dietro cui gli abitanti sbirciavano questa extraterrestre che ero io, che passeggiava a piedi in mezzo a tanto squallore.

Dopo cena, ricordo l'allegra passeggiata con Struve e la sua apparentemente arcigna segretaria nell'unico luogo degno di nota, il piccolo cimitero, con semplici tombe segnate da una lapide all'altezza della testa e una fila di pietre all'altezza dei piedi. Su un centinaio al massimo di lapidi si leggevano sempre gli stessi cognomi, non più di quattro o cinque cognomi diversi.

Intanto il paraboloide stava puntato giorno e notte su Tau Ceti, poi anche su un'altra stella simile, Epsilon Eridani, a circa 11 anni luce che oggi sappiamo ha un pianeta a una distanza poco superiore a quella di Marte dal Sole. Fu quest'ultima a far sobbalzare Drake. Improvvisamente da quella direzione arrivò un segnale fortissimo, troppo forte per essere extraterrestre. E infatti si trattava di un U2, uno di quelli aerei stratosferici che spiavano l'Unione sovietica ai tempi della guerra fredda.

Malgrado gli insuccessi il programma seguita ancora oggi, con mezzi molto più potenti e con strumenti sparpagliati su tutto il pianeta. Infatti il non aver ricevuto ancora nessun segnale da ET non significa che noi si sia soli nella nostra Galassia. Per ora abbiamo esplorato solo una regione piccolissima, estesa al massimo fino a 200 anni luce da noi, mentre il diametro della Via Lattea è di 100.000 anni luce, e per meno di 50 anni, una durata davvero insignificante. Nella nostra galassia ci sono stelle molto più vecchie del Sole, 10 o 12 miliardi di anni rispetto ai 5 miliardi del Sole. È possibile che su qualche pianeta di queste stelle si siano potute sviluppare civiltà molto più avanzate tecnologicamente della nostra: può darsi che esse ci abbiano mandato ripetutamente dei segnali, ma fino a mezzo secolo fa non eravamo in grado di captarli. Ricevere un segnale da un'eventuale civiltà extraterrestre è molto più difficile che trovare la famosa bottiglia nell'oceano. Chissà se un giorno succederà; sarà un grande avvenimento per tutta la popolazione della Terra. Intanto l'ascolto prosegue, soprattutto in quell'intervallo di lunghezze d'onda compreso fra circa 3 e 30 cm. È un intervallo particolarmente adatto, perché non ci sono forti rumori naturali che potrebbero coprire i segnali di ET. Infatti a lunghezze d'onda inferiori a 3 cm domina l'emissione della nostra stessa atmosfera, a lunghezze d'onda superiore a 30 cm domina l'emissione della Via Lattea. È quindi una zona di quiete radioelettrica, che è stata chiamata il "buco dell'acqua", perché a 21 cm cade l'emissione dell'atomo di idrogeno interstellare, a 18 cm quella dell'ossidrile OH, e $H+OH = H_2O$.

Il progetto SETI del XXI secolo utilizza ricevitori estremamente sofisticati, come quello sviluppato da Paul Horowitz di Harvard, in grado di analizzare simultaneamente 80 milioni di canali ciascuno con una banda larga solo 0,5 hertz per esplorare tutto il “buco dell’acqua”. Una banda così stretta riduce il rumore e rende più facile la scoperta di un eventuale segnale di ET. Molti dei più grandi radiotelescopi osservano simultaneamente le stesse zone di cielo, e questo permette di stabilire la distanza da cui è emesso un segnale e quindi di eliminare tutti i segnali originati dalle sonde entro il nostro sistema solare. Per esempio sono stati utilizzati in coppia il telescopio di 76 metri dell’osservatorio di Jodrell Bank in Inghilterra e quello da 305 metri di Arecibo a Puerto Rico.

La maggioranza dei tentativi di ricevere segnali extraterrestri è stata fatta utilizzando radiotelescopi; perché non si cerca di ricevere anche segnali luminosi e non solo radio? La ragione è che le stelle sono deboli radiosorgenti, ma la loro luce sovrasterebbe di gran lunga segnali luminosi artificiali, a meno che non si utilizzino laser la cui luce potrebbe superare quella della stella, ma solo per intervalli di qualche frazione di secondo. Inoltre i segnali radio non vengono arrestati dalle nubi, mentre potremmo osservare quelli luminosi solo con cielo sereno.

È diventata famosa l’equazione di Drake, un esercizio che Drake fece nel 1961, quando aveva appena iniziato le sue osservazioni per cercare di stimare quante civiltà tecnologicamente avanzate esistono nella Galassia. Si tratta veramente di un esercizio o piuttosto di un divertimento,

perché le incognite che entrano in questa equazione sono tante che praticamente ogni risultato è possibile.

Proviamo anche noi a fare questo gioco e cominciamo con lo scrivere l'equazione:

$$N = R \times S \times P \times V \times E \times I \times T \times D$$

N sarà il numero di civiltà tecnologicamente avanzate risultante dall'equazione, R è il numero di stelle che si forma ogni anno nella Galassia, S il numero di quelle simili al Sole, P la frazione di queste che ha un sistema planetario, V la frazione di questi in cui ci sono condizioni adatte allo sviluppo della vita, E la frazione di questi in cui la vita si è veramente sviluppata, I la frazione di questi in cui si è sviluppata una vita intelligente, T la frazione di quelli in cui si è sviluppata una civiltà tecnologicamente avanzata e infine D la durata di una civiltà tecnologicamente avanzata.

Si capisce subito che per mettere dei numeri al posto delle lettere occorre lavorare di fantasia, mettere dei valori ragionevoli, almeno secondo noi, quello che gli anglosassoni chiamano un *educated guess*. Proviamo dunque due ipotesi, una ottimistica e una pessimistica.

L'unico dato abbastanza attendibile è R che si ottiene dividendo il numero di stelle presenti nella Galassia per l'età di questa: 400 miliardi di stelle diviso 13 miliardi di anni, R = 30 stelle all'anno.

La frazione di stelle simili al Sole o poco più deboli può essere compresa fra il 60 e l'80%. Perché questa limitazione? Stelle molto più calde del Sole hanno una vita troppo breve, meno di 2 miliardi di anni perché sui loro

pianeti possa svilupparsi una vita intelligente, stelle molto più piccole e fredde, che rappresentano la grande maggioranza, irraggiano troppa poca luce e calore; in quanto a P si può fare la ragionevole ipotesi che tutte le stelle abbiano un sistema planetario, eccettuate magari le stelle doppie che sono circa la metà della popolazione galattica, quindi P fra 1 e 1/2.

Quanti di questi pianeti avranno condizioni favorevoli allo sviluppo della vita? Qui bisogna tirare a indovinare; supponiamo da uno su diecimila a uno su dieci, ipotesi intermedia uno su cento. E su quanti aventi le condizioni favorevoli la vita si sarà davvero sviluppata? Diciamo fra 1 e 0,1. E su quanti si avrà vita intelligente? Possiamo fare l'ipotesi che tutte le volte che appare la vita, questa si sviluppi fino a diventare intelligente e poi anche tecnologicamente avanzata, cioè I = 1 e T = 1. Ma questa è certamente un'ipotesi troppo ottimistica; potremmo immaginare un qualunque numero fra 0 e 1.

Come ipotesi pessimistica poniamo I = T= 0,0001 e come ipotesi intermedia I = T = 0,1. E infine l'ultimo indovinello. Quanto potrà durare una civiltà tecnologicamente avanzata? La nostra non ha ancora 200 anni. Secondo i pessimisti più catastrofici non potrà arrivare alla fine di questo secolo, ma secondo gli ottimisti troveremo la via ad uno sviluppo sostenibile, sapremo evitare guerre atomiche e difenderci dagli asteroidi come Apophis o anche più grossi. Possiamo sparare una cifra fra diecimila e centomila anni? O anche un milione di anni? Navighiamo veramente nel buio. Poniamo 10.000 come ipotesi inter-

media. Proviamo ora a sostituire le lettere con i numeri nell'ipotesi più ottimista e in quella più pessimista:

$$N = 30 \times 0.80 \times 1 \times 0.1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1.000.000 = 2.400.000$$

ipotesi ottimista due milioni e quattrocentomila civiltà tecnologicamente avanzate, o circa due ogni duecentomila stelle, oppure

$$N = 30 \times 0{,}60 \times 0{,}5 \times 0{,}0001 \times 0{,}1 \times 0{,}0001 \times 0{,}0001 \times 300 = 0{,}000027$$

cioè praticamente nemmeno una civiltà tecnologicamente avanzata.

Nell'ipotesi intermedia avremo:

$$N = 30 \times 0{,}6 \times 0{,}5 \times 0{,}01 \times 0{,}1 \times 0{,}1 \times 0{,}1 \times 10.000 = 0{,}9$$

E cioè una sola civiltà tecnologicamente avanzata, la nostra. Ma basterebbe che una simile civiltà durasse centomila anni perché nella Galassia ce ne possano essere nove.

È chiaro che la quantità di dati sconosciuti e difficilmente immaginabili rendono queste stime molto poco attendibili.

# L’Universo

Con il termine Universo intendiamo tutto ciò che esiste, sebbene oggi si cominci a pensare che possano esistere anche molti altri universi. In questo caso il termine universo significa tutto ciò che possiamo osservare più o meno direttamente. È solo di questo universo che ci occuperemo perché è l’unico accessibile ai nostri strumenti e soggetto alle leggi fisiche che sperimentiamo sulla Terra.

Gli eventuali altri universi che costituiscono il multiverso rientrano nel campo della metafisica, che la nostra mente può solo immaginare.

È un universo che ha una struttura gerarchica, composto dagli oggetti più piccoli che sono le stelle con i loro sistemi planetari. Queste sono i principali componenti (o almeno credevamo che fossero, prima della scoperta della materia oscura) di quei grandi continenti stellari che sono le galassie. Le galassie a loro volta fanno parte di grandi famiglie – gli ammassi di galassie – e questi dei superammassi. Tutti sono immersi in uno spazio che si dilata continuamente. Nel cercare quale è stata l’origine dell’universo, se un’origine c’è stata, come è evoluto nel tempo, ci poniamo il problema dell’uovo e della gallina: si sono formate prima le stelle o prima le galassie? E quando si sono formate? E come si sono formate?

Gli straordinari progressi della tecnologia e dell’informatica ci hanno permesso di estendere le nostre os-

servazioni indietro nel tempo a 13 miliardi e 700 milioni di anni fa e ad ottenere immagini dirette della struttura dell'universo a quell'epoca quando ancora non c'erano né le stelle né le galassie.

All'inizio del XX secolo l'universo era ancora quello di William Herschel, confermato dagli studi dell'astronomo olandese Jacobus Cornelius Kapteyn (1851-1922). La via Lattea rappresentava l'intersezione di un grande sistema di stelle a forma di disco con la volta celeste. Forse c'erano molti altri sistemi simili nell'universo, quelle macchie biancastre disseminate fra le stelle, ma di cui non si conosceva né la natura né la distanza. Invece Kapteyn, come già Herschel osserva che andando a contare le stelle in tutte le direzioni lungo i raggi del disco, il loro numero varia ugualmente con lo splendore, preso, in prima approssimazione, come misura della distanza dal Sole. Questo risultato indicherebbe che il Sole si trova al centro della Via Lattea. In questo ragionamento, si assume che tutte le stelle abbiano, più o meno, lo stesso splendore assoluto e quindi le più deboli sarebbero anche le più lontane. Oggi sappiamo che non è così; ci sono stelle anche 10.000 volte più brillanti del Sole e altre anche 10.000 volte più deboli. Ma poiché le più brillanti sono una minoranza mentre la grande maggioranza è rappresentata dalle più deboli, la semplificazione di Herschel e Kapteyn era accettabile. Quindi il risultato immediato delle osservazioni era ancora una volta che noi occupavamo una posizione privilegiata, non più la Terra al centro dell'universo, ma almeno il nostro Sole coi suoi pianeti erano al centro della

Via Lattea. Ancora una volta però le osservazioni ci tendevano un inganno.

Fu un fisico americano, Harlow Shapley (1885-1972) che avendo a disposizione il primo grande telescopio moderno, il 2,5 metri di Monte Wilson in California rivoluzionò il modello di Galassia di Herschel e Kapteyn guadagnandosi il titolo di novello Copernico. Anche Shapley voleva determinare forma e dimensioni della Via Lattea, ma invece di fare conteggi di stelle, si dedicò a censire gli ammassi globulari. Questi sono famiglie di parecchie centinaia di migliaia di stelle fino a un milione, strettamente addensate, di forma quasi sferica, diametri di qualche anno luce. A differenza delle stelle e delle nubi di gas interstellare che sono addensate sul disco, si trovano fuori del disco e occupano un volume quasi sferico attorno al disco (o equatore galattico). Shapley si accorse che il numero di ammassi globulari non restava costante in tutte le direzioni, ma raggiungeva un massimo in direzione della costellazione del Sagittario e ne dedusse che il centro galattico doveva essere in quella direzione. Ne stimò anche la distanza. In questi ammassi si trova una classe di stelle variabili, dette RR Lyrae dal nome della prima scoperta. Esse sono tutte all'incirca dello stesso splendore intrinseco, pari a circa 100 volte quello del Sole. Dalla misura del loro splendore apparente si può ricavare la loro distanza e quindi anche quella dell'ammasso di cui fanno parte. Da queste osservazioni Shapley dedusse che il sole si trova in una posizione periferica della Via Lattea e a una distanza dal centro di circa 50.000 anni luce. Questa distanza è

stata poi ridimensionata e il valore oggi accertato è 27.000 anni luce. La causa dell'errore di Herschel e di Kapteyn è la stessa che aveva fatto sovrastimare la distanza del Sole dal centro. La scoprì nel 1930 un fisico svizzero di nome Robert Trumpler. Nel mezzo interstellare sono diffuse delle minuscole particelle solide di grafite, silicati, ghiaccio di diametri inferiore al micron – le cosiddette polveri interstellari – le quali diffondono la luce delle stelle sparpagliandola in tutte le direzioni e quindi facendole apparire più deboli e quindi più lontane. Le polveri sono specialmente concentrate sul disco galattico. Herschel e Kapteyn furono tratti in inganno dal fatto che in direzione del centro galattico cresce il numero di stelle ma cresce anche la densità delle polveri, mentre in direzione opposta decresce il numero di stelle ma decresce anche la densità delle polveri, simulando così una crescita uniforme di stelle con la distanza lungo tutti i raggi del disco. Fuori del disco dove sono situati gli ammassi globulari la densità delle polveri è molto minore, ma comunque tale da far apparire le RR Lyrae degli ammassi più deboli e quindi più lontane del vero.

Nel 1917 Shapley pubblica i risultati delle sue osservazioni: la Galassia è un sistema appiattito a forma di lente, popolato da stelle e nebulosità; ha un diametro di circa 300.000 anni luce e il suo centro lo vediamo proiettato nella costellazione del Sagittario a 50.000 anni luce da noi.

Nessuno fu sconvolto dall'idea di non essere al centro della Galassia, però un nuovo problema divise gli scien-

ziati. Shapley era persuaso che tutte quelle macchie biancastre definite come "nebulose" appartenessero alla Via Lattea e magari che questa riempisse uniformemente tutto l'universo osservabile; altri e fra questi il principale oppositore di Shapley. Herbert Curtis (1872-1942), un astronomo dell'altro grande osservatorio californiano, quello di Lick su Monte Hamilton, era convinto che gran parte delle nebulose fossero esterne alla Via Lattea e anch'esse galassie come la nostra. Le due opposte opinioni furono discusse in un dibattito pubblico il 26 aprile 1920 presso la sede della National Academy of Sciences a Washington. Era l'Osservatorio di Mount Wilson contro l'Osservatorio di Lick, il trentacinquenne Shapley contro il quasi cinquantenne Curtis. Il dibattito fu molto acceso ma mancavano dati certi per poter stabilire chi dei due avesse ragione e così tutti rimasero della loro opinione. Frattanto però un altro astronomo di Monte Wilson, Edwin Hubble (1889-1953) si era dedicato all'osservazione delle nebulose per capire cosa veramente erano: nubi di gas o sistemi stellari come la Via Lattea? Col telescopio di Monte Wilson mostrò che la nebulosa di Andromeda era un sistema simile alla Via Lattea, riuscì anche a scoprire la presenza in essa di alcune stelle variabili in tutto simili a quelle presenti nella Via Lattea e di cui era noto lo splendore intrinseco; facendo la plausibile ipotesi che anche le variabili della galassia (e non più nebulosa) di Andromeda avessero lo stesso splendore intrinseco, dalla misura dello splendore apparente ne determinò la distanza – circa un milione di anni luce – una distanza molto maggiore di

quella delle più lontane stelle della Via Lattea. Una più precisa conoscenza delle caratteristiche fisiche di queste variabili e quindi del loro splendore intrinseco che era stato sottostimato ha stabilito che la distanza della galassia di Andromeda è il doppio, due milioni di anni luce. Ormai Hubble era convinto che esistessero due tipi di nebulose: delle vere e proprie nubi di gas dalla forma irregolare, e di grande estensione angolare, facenti parte della Via Lattea, come per esempio la nebulosa di Orione; e quelle di forma più regolare, sferica, ellittica o a spirale e generalmente di modesta estensione angolare, a grande distanza dalla Via Lattea e anch'esse grandi sistemi di stelle. Per avere la certezza sulla natura fisica degli oggetti delle due classi era necessario osservarne lo spettro. Hubble intraprese una serie sistematica di osservazioni di spettri di nebulose, che confermarono le sue intuizioni. Le nebulose di forma irregolare mostravano lo spettro tipico dei gas rarefatti: uno spettro di righe brillanti, le emissioni caratteristiche dei gas presenti nella nebulosa, mentre quelle di forma più regolare mostravano uno spettro continuo solcato da righe scure, tipico delle stelle. Le più vicine, come, oltre alla galassia di Andromeda quella del Triangolo, o le Nubi di Magellano mostravano chiaramente la loro natura di famiglie di stelle e la presenza in esse di stelle variabili di splendore intrinseco noto permetteva di stabilire che le loro distanze erano ben superiori alle dimensioni della Via Lattea. Hubble ottenne numerosi spettri di nebulose dei due tipi e altrettanti ne aveva ottenuti un astronomo di Lick, Vesto Slipher (1875-1969).

Nei progressi della scienza il caso gioca spesso un ruolo importante; numerosi sono i casi di serendipity, come dicono gli anglosassoni, cioè di scoperte inaspettate, risultato di esperimenti immaginati per tutt'altro scopo. Hubble voleva scoprire la vera natura delle nebulose, ma esaminando gli spettri di tipo stellare di quelle che aveva chiamato nebulose extragalattiche si accorse che tutte le righe spettrali erano sistematicamente spostate verso il rosso rispetto alla posizione che hanno in laboratorio. Non solo, lo spostamento era tanto maggiore quanto maggiore era la distanza dell'oggetto osservato. Cosa poteva significare? Era chiaramente dovuto a effetto Doppler: quando una sorgente di onde sonore o di onde luminose si allontana dall'osservatore questi riceve onde di lunghezza d'onda maggiore (o di frequenza minore) di quella emessa, il contrario succede quando la sorgente si avvicina. È un effetto che sperimentiamo, senza farci troppa attenzione, quando viaggiamo in autostrada. Se per esempio un tizio arrogante con macchina potente suona con insistenza il clacson per superarci e per superare chi è davanti a noi, noteremo che il suono del suo clacson è modulato, è più acuto fino a che ci ha raggiunti e poi diventa sempre più grave via via che si allontana, mentre se noi suoniamo il nostro clacson questo emette una nota fissa perché è fermo rispetto a noi. Nel caso delle galassie lo spostamento verso il rosso indica che tutte le galassie si allontanano da noi. In realtà non tutte; fra quelle più vicine e facenti parte della nostra famigliola – il gruppo locale – alcune si avvicinano, altre si allontanano, perché stanno orbitando attorno al

baricentro del gruppo seguendo le stesse leggi kepleriane che seguono i pianeti orbitanti attorno al Sole. Ma consideriamo le altre, quelle non facenti parte del gruppo locale. Perché tutte si allontanano con velocità crescente con la distanza? E perché le velocità dedotte da gli spostamenti Doppler sono molto più alte di quelle che si osservano per le stelle galattiche? Quest'ultime infatti orbitando attorno al centro della Via Lattea hanno velocità rispetto al Sole da qualche km/sec a un centinaio circa di km/sec; per le galassie invece si osservano velocità di molte centinaia. migliaia, decine di migliaia di km/sec. Queste osservazioni lasciarono perplesso Hubble, che infatti parla di velocità apparenti. Qualcuno immagina che ci sia stata una grande esplosione che ha scaraventato tutte le galassie in tutte le direzioni. E poiché la legge di variazione della velocità è la stessa in tutte le direzioni, ancora una volta ci si immagina di essere al centro dell'esplosione. Ma anche se così fosse, ci si aspetterebbe che la velocità decrescesse con la distanza o al massimo – non frenata nello spazio vuoto- restasse costante. La spiegazione è ben diversa: non sono le galassie che fuggono, è lo spazio in cui sono immerse che si dilata, che espande. Lo si capisce bene con un semplice esempio gastronomico.

Pensate alla pasta di un dolce che sta lievitando. Se in essa sono immersi dei canditi, ognuno di questi si allontanerà dagli altri trascinato dal gonfiarsi della pasta sotto l'azione del lievito. A un ipotetico abitante di un candito sembrerà che i canditi più lontani da lui abbiano velocità maggiori di quelli più vicini. Se infatti in un dato

tempo *t* tutte le distanze raddoppiano, poiché la velocità è data dalla distanza percorsa diviso il tempo, al nostro osservatore sembrerà che i canditi più lontani abbiano velocità maggiori di quelli più vicini, avendo percorso distanze maggiori nello stesso tempo *t*. Inoltre nella pasta che lievita non c'è un centro da cui parte il rigonfiamento; il lievito agisce ugualmente in ogni punto della pasta che comincia a gonfiarsi simultaneamente in tutte le sue parti (almeno se l'impasto è stato mescolato bene). Così anche il nostro universo sta lievitando trascinando le galassie nel suo moto di espansione. Dalle sue osservazioni Hubble stabilì la legge che porta il suo nome: $V = Hd$, cioè la velocità di allontanamento lungo la direzione osservatore-galassia (o velocità radiale) cresce proporzionalmente alla distanza *d*, e H è la costante di proporzionalità. È chiaro il significato di H: $d/V = 1/H$ rappresenta il tempo trascorso dall'inizio dell'espansione. Se per es. percorro la distanza di 100 km alla velocità di 50 km/ora anche un bambino mi dirà che impiegherò 2 ore. Determinare H è stato uno dei più importanti problemi della cosmologia del XX secolo, problema di non facile soluzione perché se è semplice misurare V dallo spostamento delle righe spettrali, misurare la distanza delle galassie non è altrettanto semplice. Occorre trovare delle stelle di cui si presume di conoscere molto bene la struttura fisica e quindi anche il loro splendore intrinseco, rivelato da quantità facilmente osservabili, come lo spettro o la variabilità di luce: allora dallo splendore intrinseco assunto e da quello apparente misurato si risale alla distanza della galassia che le con-

tiene. I primi campioni di distanza utilizzati da Hubble erano stelle variabili di una particolare classe detta Cefeidi. Gli splendori intrinseci assunti erano errati, troppo deboli e quindi le distanze sottostimate; i primi valori di 1/H davano per l'inizio dell'espansione, che allora si dava per scontato rappresentasse anche l'inizio dell'universo, solo 2 miliardi di anni, un assurdo, dato che misure ben precise del carbonio radioattivo indicavano per la Terra un'età di quasi 5 miliardi di anni. Poi gli errori sono stati corretti, si sono trovati altri campioni di distanza e le moderne misure ci dicono che il tempo trascorso dall'inizio dell'espansione a oggi è compreso fra 13 miliardi e 600 milioni e 13 miliardi e 700 milioni di anni.

Quando in una conferenza pubblica mi capita di raccontare la serie di osservazioni che ci hanno permesso di ricostruire la storia passata dell'universo, cerco di insistere sul fatto che sono le osservazioni che hanno permesso ciò, perché altrimenti sembra proprio che raccontiamo una favola, e anche a me capita di meravigliarmi quando osservando un cielo stellato (sebbene sia sempre più difficile trovare un luogo abbastanza buio per poterlo osservare) penso che tutto ciò che abbiamo capito sulla natura fisica delle stelle e delle galassie e dell' universo nel suo insieme è scritto in quelle deboli luci di quei minuscoli puntini luminosi che sono le stelle, scrittura che abbiamo imparato a decifrare da poco più di un secolo, con la nascita della fisica moderna.

La scoperta di Hubble ha dato origine a due modelli di universo: stazionario e evolutivo, in contrasto fra loro,

contrasto che è durato fino agli anni '60 quando le osservazioni hanno decisamente mostrato che viviamo in un universo evolutivo.

Il modello evolutivo parte dalla constatazione che l'universo è in espansione, che secondo i valori più recenti della costante di Hubble, sarebbe cominciata 13 miliardi e 700 milioni di anni fa. Tutta la materia presente oggi nell'universo sarebbe stata concentrata in un volume inferiore a quello di una particella elementare, a temperatura e densità enormi, praticamente infinite. Per ragioni sconosciute si sarebbe liberata una qualche energia che avrebbe dato luogo all'espansione.

I sostenitori dell'universo stazionario trovavano che questa ipotesi somigliava un po' troppo al *fiat lux* della Bibbia e suggerirono l'altra ipotesi dell'universo stazionario. Erano Fred Hoyle, Hermann Bondi e Thomas Gold, i quali dovevano comunque tener conto del dato osservativo dell'espansione, ma immaginarono che l'energia di espansione si tramutasse in energia di creazione della materia mantenendo costante la densità media dell'universo. La teoria della relatività generale di equivalenza fra massa e energia giustifica questa ipotesi.

I sostenitori delle due ipotesi hanno immaginato e suggerito osservazioni in grado di dare una risposta definitiva e la risposta è venuta da un suggerimento fatto dal fisico di origine russa George Gamov nel 1948. Egli era un sostenitore dell'ipotesi evolutiva e il suo ragionamento era il seguente: l'espansione dell'universo avrebbe causato una continua diminuzione della temperatura media che

da miliardi di miliardi di gradi in una diecina di miliardi di anni, secondo i suoi calcoli, sarebbe scesa a valori prossimi allo zero assoluto (–273 gradi centigradi). Un mezzo a temperatura di qualche grado assoluto emette radiazione con un massimo nel dominio delle microonde, ma all'epoca una strumentazione adeguata non c'era. L'idea di Gamov era stata quasi dimenticata, solo due fisici dell'Università di Princeton, Robert Dicke e James Peebles, all'inizio degli anni '60 stavano progettando uno strumento per tentare di verificarla. Ecco che nel 1965 due ingegneri della Bell Telephone Company, Arno Penzias e Robert Wilson, che erano anche radioastronomi dilettanti, furono incaricati di stabilire quali erano le cause di rumore che disturbavano le trasmissioni a microonde da e verso i satelliti artificiali.

Fu così che oltre alle cause naturali, come l'irraggiamento da parte della nostra atmosfera, e a quelle dovute all'attività umana, come trasmissioni radio, televisive ecc., si accorsero di un debole rumore proveniente con eguale intensità da tutte le parti del cielo la cui natura restava per loro inspiegabile.

Consultarono gli astrofisici della vicina università di Princeton, che da una parte si rallegrarono di veder confermati i risultati che si aspettavano dalle loro ricerche, dall'altra forse ci rimasero male, bruciati sul tempo; ancora una volta la serendipity, la scoperta per caso, aveva vinto su quella programmata.

Queste prime misure e poi quelle successive con strumenti più sensibili e situati su satelliti, per evitare i disturbi

causati dalla nostra atmosfera, hanno confermato che lo spazio è permeato di radiazione con un massimo di intensità a lunghezze d'onda comprese fra un mm e un cm, con una curva a campana (una planckiana) tipica di quello che in fisica si chiama un radiatore perfetto o corpo nero, indicante una temperatura di circa 3 gradi assoluti, più esattamente 2,7 K dove K sta per gradi kelvin, dal nome del fisico irlandese William Kelvin, che ha dato molti contributi alla teoria della radiazione elettromagnetica.

Questa scoperta ha stabilito che il nostro universo è evolutivo e ha affossato la teoria dell'universo stazionario, perché un universo che non ha mai attraversato una fase ad alta temperatura non è in grado di spiegare la presenza della radiazione a 3 K; questa è stata poi chiamata radiazione fossile, perché è il residuo dell'universo primordiale. Questa scoperta è stata ancora più importante perché grazie ad essa la cosmologia è diventata una vera e propria scienza sperimentale.

Le prime osservazioni di Penzias e Wilson erano molto disturbate dal rumore della nostra atmosfera, e perciò nel novembre 1989 fu lanciato un satellite di nome COBE (COsmic Background Explorer) che non solo doveva fare misure più precise ma anche rispondere ad un assillante interrogativo: la radiazione fossile sembrava perfettamente uniforme in tutte le direzioni; come poteva aver generato un universo come quello che conosciamo oggi, popolato da concentrazioni di materia – gli ammassi di galassie e le galassie – separati da grandi spazi vuoti? Queste disuniformità che osserviamo oggi dovevano già essere presenti

nell'universo primordiale. COBE aveva il compito di scoprirle, se c'erano. E dopo qualche anno di osservazioni COBE scoprì che c'erano effettivamente delle regioni un po' più calde e dense e delle regioni un po' più fredde e rarefatte, ma le differenze di temperatura erano minime: qualche centomillesimo di grado in più o in meno del valore medio di 2,7 K. Evidentemente le regioni più calde e dense erano i semi da cui si sarebbero poi originati i futuri ammassi di galassie e le galassie. Ma COBE aveva un difetto: era fortemente miope, nel senso che riusciva a distinguere soltanto dettagli separati da almeno 7 gradi.

Poiché noi vediamo il Sole o la Luna sotto un angolo di mezzo grado, si potevano vedere delle macchie estese quanto 14 lune messe in fila, un'immagine molto sfocata dell'universo.

Se in queste macchie è nascosta l'immagine dell'universo bambino, per vedere le tracce degli ammassi di galassie in formazione è necessario uno strumento in grado di vedere dettagli molto più fini. Ricordiamoci che stiamo osservando l'immagine dell'universo di 13,7 miliardi di anni fa e che quindi i dettagli che osserviamo si trovano a 13,7 miliardi di anni luce. Assumendo per le dimensioni di un superammasso un valore indicativo di un centinaio di milioni di anni luce, osservato da una distanza di 13,7 miliardi di anni luce, lo vedremo sotto un angolo di circa 7 millesimi di radiante pari a circa 24 primi. I vari esperimenti successivi, come Boomerang o WMap in grado di distinguere dettagli più piccoli di un grado hanno dato delle immagini molto più dettagliate dell'universo bambi-

no. Immagini che nascondono straordinarie informazioni sul nostro universo, sulla sua geometria e sulla sua composizione[1].

L'immagine dell'universo dataci direttamente da COBE, Boomerang, WMap ci mostra l'universo bambino, mentre l'universo neonato non è direttamente osservabile. L'universo diventa direttamente osservabile solo quando la temperatura, dagli altissimi valori iniziali, scende a circa 3000 K e il gas da ionizzato diventa neutro. Mentre il gas ionizzato è opaco alla radiazione e costituisce una specie di muro luminoso che ci impedisce di vedere oltre, il gas

[1] Lo stato della materia che compone l'universo dipende dalla sua temperatura e densità medie, quantità che variano continuamente per effetto dell'espansione. È ben noto che la densità di un corpo, in particolare di un fluido, è data dal rapporto fra la sua massa e il volume, e quindi se il volume aumenta o diminuisce la densità diminuisce o aumenta in modo inversamente proporzionale al cubo delle sue dimensioni. Meno noto è come varia la temperatura, che cresce o diminuisce in modo inversamente proporzionale alle dimensioni del volume considerato. Lo si capisce, tenendo conto del fatto che l'energia di un fotone è dato da $h\nu = hc/\lambda = kT$. Poiché la lunghezza d'onda $\lambda$ si allunga con l'espansione come tutte le altre lunghezze (simulando una velocità di allontanamento), il fatto che T sia inversamente proporzionale a $\lambda$ comporta che la temperatura cala linearmente al crescere delle dimensioni. In un universo che non sappiamo se sia finito o infinito, non ha senso parlare di raggio, parleremo invece di scala intesa come la distanza fra due ammassi qualsiasi di galassie. Indicando la scala con $l$ e con $\rho$ la densità potremo scrivere la legge di variazione con la scala della temperatura e densità medie dell'universo:

$$T = \text{costante}\frac{1}{l} \text{ e } \rho = \text{costante}\frac{1}{l^3}$$

neutro è trasparente e la radiazione da esso emessa può raggiungerci dopo un viaggio durato quasi 14 miliardi di anni[2].

Infatti alle altissime temperature seguenti immediatamente l'inizio dell'espansione (che nel seguito chiameremo semplicemente l'inizio, anche se non sappiamo se sia veramente anche l'inizio dell'universo) l'unico stato possibile della materia è una zuppa di particelle elementari – quark, elettroni, neutrini e molte altre instabili e forse in parte ancora sconosciute; col diminuire della temperatura si formano protoni e neutroni, ciascuno composto da tre quark, mesoni composti da due quark e altre particelle composte da vari tipi di quark. A tre minuti circa dall'inizio la temperatura è scesa a valori di circa un miliardo di gradi e la densità è circa pari a quella dell'acqua: protoni e neutroni hanno energia sufficiente per dar luogo a semplici reazioni nucleari. Un protone, che ricordiamo è il nucleo dell'atomo di idrogeno, più un neutrone forma il nucleo dell'idrogeno pesante o deuterio; due protoni più un neutrone l'isotopo meno abbondante dell'elio, due pro-

[2] La più antica immagine dell'universo mostrataci dalle osservazioni a microonde è quella corrispondente all'epoca in cui la temperatura era scesa a circa 3000 K, tale da mantenere la materia nello stato di gas neutro, trasparente alla radiazione. Il dato che la distribuzione della radiazione emessa è una planckiana indicante la temperatura di circa 3 K ci dice che osserviamo l'universo a uno spostamento verso il rosso z = 1000. Infatti z = (λ osservata-λ emessa) / λ emessa = (1 mm-0,001 mm) / 0,001 mm = 1000; 1 mm e 0,001 mm sono le lunghezze d'onda a cui le planckiane corrispondenti a temperature di 3 K e di 3000 K rispettivamente presentano il massimo di irraggiamento.

toni più due neutroni l'elio più abbondante in natura; può formarsi anche del litio, tre protoni più quattro neutroni. Intanto l'espansione prosegue, la temperatura diminuisce e dopo circa otto minuti dall'inizio protoni e neutroni non hanno più energia (o velocità) sufficienti per dar luogo alla formazione di elementi più pesanti. Invece prima dei tre minuti le energie delle particelle sono tali che coi loro urti frammenterebbero subito nuclei più complessi del singolo protone. È possibile calcolare le percentuali di deuterio, dei due isotopi di elio, $He_3$ e $He_4$ e di litio $Li_7$ formatesi fra tre e otto minuti e confrontarli con le quantità effettivamente osservate.

Si trova che il 23% della massa è rappresentata da $He_4$, quasi tutto il restante 77% è idrogeno, mentre $He_3$ e deuterio contribuiscono con qualche atomo su centomila di idrogeno e il litio con pochi atomi su 10 miliardi di atomi di idrogeno. I prodotti della nucleosintesi primordiale calcolati sono in buon accordo con le abbondanze cosmiche osservate, e ciò costituisce un'altra prova a favore dell'universo evolutivo.

Ma cosa succede dopo i primi otto minuti? La temperatura e la densità seguitano a diminuire, e si calcola che dopo circa 400.000 anni la temperatura è scesa a 3000 gradi K. In tutto questo tempo la materia è sotto forma di plasma, cioè un miscuglio di protoni e elettroni liberi, oltre a neutroni, neutrini e altre particelle instabili. Un plasma è un gas neutro nell'insieme perché composto da egual numero di particelle cariche positivamente e negativamente, ma ionizzato. Un gas ionizzato è completamente

opaco alla radiazione; si potrebbe visualizzare la situazione in questo modo: i fotoni rimbalzano da una particella carica all'altra andando avanti e indietro a zig zag, e pur muovendosi freneticamente non avanzano e quindi noi non potremo vedere direttamente l'immagine dell'universo primordiale. È come se ci fosse un muro di luce, una specie di fitta nebbia luminosa. Ma dopo i 400.000 anni, quando la temperatura scende sotto i 3000 K il gas da ionizzato diventa neutro: protoni e particelle alfa (i nuclei di elio) si combinano con gli elettroni, e i fotoni possono muoversi liberamente attraverso questo gas di particelle neutre giungendo fino a noi, dopo un viaggio durato quasi 14 miliardi di anni, a mostrarci l'immagine dell'universo bambino, quelle regioni più o meno dense che rappresentano i semi delle strutture odierne fatte di agglomerati di materia – le galassie e gli ammassi di galassie – separati da immensi spazi vuoti. Dopo questa immagine dell'universo bambino, gli oggetti più lontani che sono stati osservati sono le galassie distanti più di 10 miliardi di anni luce, la più lontana osservata dal telescopio spaziale Hubble (HST) è a 13 miliardi di anni luce; la vediamo com'era quando l'età dell'universo era di soli 700 milioni di anni. Cosa è successo in questi 699 milioni e 600mila anni? Non abbiamo che delle osservazioni molto incerte, la cui interpretazione è soggetta a molte critiche. Ma in questo lungo intervallo di tempo deve per forza essere successo qualcosa di straordinariamente importante, anche per noi stessi.

L'universo bambino è un universo composto esclusivamente di idrogeno ed elio con qualche traccia di litio. Le

più vecchie galassie osservabili come quelle a 13 miliardi di anni luce contengono stelle e nubi non troppo diverse da quelle della nostra Via Lattea, composte prevalentemente di idrogeno ed elio, ma anche di apprezzabili impurità di tutti gli altri elementi, in particolare carbonio, azoto, ossigeno, neon, calcio, magnesio, silicio, ferro e tutti gli altri metalli. Dove e quando si sono formati tutti questi elementi? Gli unici luoghi abbastanza caldi e densi da permettere reazioni nucleari in grado di sintetizzare tutti questi elementi sono i noccioli centrali delle stelle, e non di tutte ma di quelle molto più grosse del Sole, con masse almeno 20 e più volte quella solare. Allora vuol dire che ad un'epoca compresa fra 400.000 e 700 milioni di anni si sono formate queste grandi stelle che hanno vissuto la loro breve vita irraggiando enormi quantità di energia, frutto delle reazioni nucleari che avvenivano nel loro interno e che hanno causato una fine esplosiva, nel corso della quale hanno seminato il mezzo interstellare di elementi pesanti, che saranno poi serviti a formare nuove stelle e nuove galassie, ma anche pianeti e esseri viventi come noi.

Queste prime stelle formate soltanto di idrogeno, elio e litio dovevano essere molto grosse, si stima abbiano avuto masse di almeno 100 o 200 masse solari, e come vedremo parlando della vita delle stelle, una vita molto breve in scala astronomica, meno di un milione di anni, una temperatura superficiale di qualche decina di migliaia di gradi e avrebbero irraggiato soprattutto nell'ultravioletto. Sarebbero finite con una grandiosa esplosione, come quelle che osserviamo quando esplode una supernova.

Il loro grande numero e la loro breve vita avrebbero prodotto rapidamente tutti quelli elementi pesanti che osserviamo nelle più lontane galassie. Ma queste esplosioni hanno lasciato qualche traccia osservabile? Forse. Satelliti per l'osservazione dell'infrarosso hanno osservato l'esistenza di un fondo di radiazione infrarossa che potrebbe essere dovuto all'emissione ultravioletta di queste antiche supernovae, e dallo spostamento verso il rosso dell'emissione si può stimare che si stia osservando un'epoca corrispondente a 200 o 300 milioni di anni dopo l'inizio dell'espansione. Si tratta comunque di dati ancora molto incerti.

Ma nelle immagini dell'universo bambino sono racchiusi altri importanti dati. Qual è la geometria dell'universo: è piano, curvo e aperto o curvo e chiuso?

Un universo in espansione è sottoposto a due forze opposte, la forza che ha dato inizio all'espansione e la forza gravitazionale che la frena. Se l'universo espanderà per sempre o sarà soggetto a una successiva fase di contrazione e a un nuovo collasso, dipende dalla densità di materia e energia contenuta nell'universo. Si chiama densità critica quella per cui c'è perfetto equilibrio fra le due forze. La densità dell'universo è quella che ne determina la geometria. Un universo con densità superiore alla densità critica sarà un universo curvo e chiuso (la superficie di una sfera è l'analogo a due dimensioni). Come a piccola scala il Sole incurva lo spazio circostante creando una specie di imbuto che obbliga i pianeti ad orbitargli attorno, secondo la spiegazione della gravitazione data da Einstein nella sua teoria della relatività generale, così a grande

scala l'insieme di materia e energia curva lo spazio. Se la densità è inferiore alla densità critica lo spazio sarà curvo e aperto (la superficie di un iperboloide o di una sella è l'analogo a due dimensioni), mentre per densità eguale alla densità critica avremo uno spazio piano, cioè uno spazio che obbedisce alla geometria euclidea. Come si distingue uno spazio euclideo da uno curvo aperto o da uno curvo e chiuso? Sono le proprietà geometriche che distinguono i tre tipi di spazi. Per es. nello spazio euclideo la somma degli angoli di un triangolo è uguale a 180 gradi, in uno spazio curvo e chiuso supera 180 mentre in uno curvo e aperto è inferiore a 180. Oppure in un piano la circonferenza è proporzionale al raggio del cerchio e l'area del cerchio è proporzionale al quadrato del raggio, mentre se tracciamo un circolo sulla superficie di una sella constateremo che circonferenza e area crescono più rapidamente, e invece sulla superficie di una sfera circonferenza e area crescono più lentamente della prima e seconda potenza del raggio rispettivamente.

Inoltre in un universo piano i raggi provenienti da una qualsiasi sorgente luminosa, per es. una stella, si propagano in linea retta, mentre in un universo curvo e aperto si propagano secondo linee curve con l'effetto che farebbe una lente divergente; in uno spazio curvo e chiuso i raggi si propagano secondo linee curve con l'effetto che farebbe una lente convergente. Quindi in un universo aperto le immagini delle lontane galassie sarebbero rimpiccolite mentre in un universo chiuso sarebbero ingrandite. Se quindi conoscessimo le reali dimensioni e la distanza di

una galassia potremmo confrontare le dimensioni angolari osservate con quelle calcolate per i tre casi e stabilire la geometria dell'universo. Purtroppo non conosciamo con sufficiente precisione le reali dimensioni di una lontana galassia. Però la radiazione cosmica di fondo ci da la soluzione. Infatti nell'immagine del fondo cosmico si osservano le strutture presenti nell'universo primordiale. All'epoca della ricombinazione l'età dell'universo è di circa 300.000 anni e quindi qualsiasi fotone ha percorso 300.000 anni luce. Regioni di universo più lontane fra loro di 300.000 anni luce all'epoca della ricombinazione non possono "vedersi" e quindi non si possono formare strutture più grandi di 300.000 anni luce. Le strutture più piccole sono state soggette a due forze opposte – la gravità e la pressione dei fotoni. La scala di 300.000 anni luce dovrebbe essere evidente nell'immagine perché separa comportamenti fisici del plasma diversi che originano due classi di strutture. Ci si aspetta di osservare strutture caratterizzate dalla differenza di temperatura rispetto al fondo aventi dimensioni angolari corrispondenti a dimensioni lineari di circa 300.000 anni luce. Ed è proprio quello che si osserva[3].

[3] Le regioni più dense che si osservano nel plasma primordiale sono soggette a due forze opposte: la forza di gravità che tende ad aumentare la densità, e l'interazione dei fotoni con gli elettroni liberi che contrasta l'azione della gravità. Quindi nel plasma primordiale si assiste a tutta una serie di oscillazioni sotto l'azione di queste due forze opposte e questo va avanti fino al momento della ricombinazione cioè fino a quando la temperatura è scesa a quel valore di circa 3000 K a cui protoni ed elettroni si combinano a formare atomi neutri. Infatti in un gas neutro i fotoni interagiscono molto meno efficacemente con la

Tutte le osservazioni della radiazione fossile compiute da palloni stratosferici o da satelliti aventi una vista abbastanza acuta da poter discernere dettagli più piccoli di un grado, diciamo una diecina di minuti d'arco, indicano che la massima differenza di temperatura di quasi 80 milionesimi di grado la si incontra per strutture di dimensione angolare di circa un grado, il valore cioè che ci si aspetta da un universo piano, che obbedisce cioè alla geometria euclidea. Questo picco è il primo picco acustico prodotto dal contrasto fra gravità e pressione dei fotoni. Se l'universo fosse curvo e chiuso il picco cadrebbe in corrispondenza di valori maggiori di un grado, il contrario avverrebbe per un universo curvo e aperto.

Il secondo picco chiaramente osservabile lo si ha per strutture di mezzo grado o frequenza acustica doppia di quella fondamentale e il terzo ancora chiaramente visibile per frequenza tripla di quella fondamentale e cioè per strutture di 20 primi d'arco. Poiché queste strutture sono il risultato della competizione fra forza di gravità e pressione dei fotoni, esse ci danno il rapporto fra normale materia barionica, che è soggetta alle due forze e materia oscura, soggetta alla sola gravità. L'abbondanza di quest'ultima

materia (che perciò è trasparente alla radiazione). Solo allora la materia può cominciare ad addensarsi per formare i futuri ammassi di galassie e galassie. Le compressioni e rarefazioni producono vere e proprie onde acustiche, in tutto simili a quelle che un suono produce nell'aria. Qui al posto dell'aria abbiamo il plasma. Nell'universo odierno lo spazio interstellare e intergalattico è talmente rarefatto da potersi considerare vuoto, in cui le onde acustiche non possono propagarsi.

determina l'importanza del terzo picco, che però anche le più precise osservazioni ottenute dal satellite della NASA WMap non consentono di misurare con sufficiente precisione. Occorre aspettare il satellite dell'agenzia spaziale europea, PLANCK, per ottenere risultati ancora più precisi.

Il fatto che queste osservazioni stabiliscano che l'universo è piano comporta di conseguenza che la sua densità sia eguale alla densità critica. Ciò ha posto un grosso problema ai cosmologi. Le osservazioni astronomiche ci dicono che la materia presente nell'universo è di gran lunga inferiore a quella necessaria per raggiungere la densità critica. Le osservazioni del secondo e terzo picco acustico ci dicono che la materia barionica contribuisce appena col 4% e la materia oscura col 23%.

E il restante 73%? La scoperta della misteriosa energia oscura che accelera l'espansione potrebbe essere la risposta. L'universo sarebbe composto per il 4% della familiare materia barionica, di cui siamo fatti anche noi e tutto ciò che vediamo e conosciamo, per il 23% di materia oscura, che non sappiamo ancora cosa sia e per il 73% dell'ancora più misteriosa energia oscura.

Una domanda che gli studenti di fisica mi hanno fatto spesso riguarda il significato della temperatura di 2,7 K, che per semplicità chiameremo la 3 K. Questa temperatura è quella di ricombinazione che noi vediamo ridotta di un fattore 1000 per l'effetto dello spostamento verso il rosso dovuto all'espansione? e allora come è possibile calcolare la temperatura dell'universo primordiale invisibile

perché posto oltre il muro di luce, partendo da essa e non dalla temperatura media odierna dell'universo?

Poiché la temperatura è inversamente proporzionale alla scala dell'universo e quindi anche alla lunghezza d'onda che come tutte le lunghezze cresce linearmente con l'espansione, ne segue il duplice significato fisico di T = 3 K.

All'epoca della ricombinazione T = 3000 K, perciò 3 K è quella che si misura per effetto dello spostamento verso il rosso z = 1000. Però rappresenta anche la vera temperatura media dell'universo oggi perché questa diminuisce linearmente al crescere della scala. Quindi se era 3000 K all'epoca della ricombinazione, oggi che la scala è aumentata di 1000 volte sarà uguale a 3 K.

In conclusione: osservare la radiazione fossile vuole dire vedere com'era distribuita la temperatura della materia all'epoca della ricombinazione, cioè vedere la vera immagine dell'universo a quell'epoca corrispondente a z=1000, ma vuol dire anche che la vera temperatura media dell'universo oggi è 3 K perché l'espansione lo ha raffreddato di 1000 volte.

## *Formazione ed evoluzione delle stelle*

Conosciamo una grande varietà di stelle: da quelle con una massa pari a venti o trenta volte quella del Sole e splendenti come diecimila soli e stelle di massa pari a un decimo di quella solare e cento volte meno splendenti. Le

loro temperature superficiali variano da 30.000 a 2000 gradi e ci appaiono rispettivamente di colore biancoazzurro e rossastro. Ci sono stelle giovanissime formatesi meno di mezzo milione di anni fa e stelle vecchie, d'età superiore a 10 miliardi di anni, stelle singole e stelle facenti parte di un sistema binario o multiplo, stelle la cui luminosità resta costante per miliardi di anni e stelle variabili in modo più o meno regolare o addirittura soggette ad imprevedibili esplosioni. Dalla analisi della radiazione emessa da queste stelle e dalla conoscenza delle leggi dei gas sperimentate nei laboratori terrestri si riesce a ricostruire formazione, struttura ed evoluzione delle stelle, dalla nascita alla morte.

Le stelle, di cui il Sole è l'esemplare più vicino e meglio conosciuto, sono degli enormi palloni di gas. Infatti anche alle temperature superficiali delle più fredde – circa 2000 gradi, l'unico stato possibile della materia è quello gassoso. Quindi dal centro alla superficie lo stato della materia è quello gassoso: ma a scuola ci hanno insegnato che il gas è quello stato della materia che occupa tutto il volume che ha a disposizione. Se si perfora l'involucro di un palloncino, il gas si disperde immediatamente nell'aria. Eppure il Sole e le stelle non hanno nessun involucro e le osservazioni geologiche ci dicono che il Sole ha quasi 5 miliardi di anni. La struttura di una stella è un miracolo di equilibrio fra due forze opposte: la forza di gravità che tende a schiacciare tutta la materia sotto il proprio peso e la forza di pressione del torrido gas centrale che tende invece a disperderla nello spazio interstellare. È il gioco

fra queste due forze che spiega come si forma ed evolve una stella.

In quelle grandi famiglie di stelle che sono le galassie, come la nostra Via Lattea, lo spazio fra stella e stella è praticamente vuoto con densità di un atomo di idrogeno per cm cubo o anche meno e quantità ancora minori di polveri. Quest'ultime sono minuscole particelle solide di grafite, silicati, ghiaccio sporco, contenenti impurità di vari elementi, tutte con diametri inferiori al millesimo di millimetro. Rispetto ai singoli atomi sono masse gigantesche e perciò li attraggono con la loro forza di gravità; si formano così degli agglomerati di materia, che ne attraggono altra, e più l'agglomerato cresce più cresce la sua forza di attrazione gravitazionale. Si spiega così la presenza negli spazi interstellari delle nubi interstellari, che sono vere e proprie incubatrici di stelle in formazione. In queste nubi si formano casualmente regioni più o meno dense e in quelle più dense la forza di gravità lavora per far nascere una stella. È stato un fisico inglese, James Jeans a dimostrare che se la massa iniziale di un agglomerato gassoso supera un certo limite (detto perciò limite di Jeans) dipendente dalla temperatura e dalla densità del gas, questo comincia a crescere a spese delle regioni vicine, mentre se la massa è inferiore a questo limite, si dissolve nel mezzo circostante. È intuitivo che la massa limite dovrà essere tanto più grande quanto maggiore è la temperatura del gas, (e quindi l'agitazione termica delle particelle che lavora contro la gravità) e quanto minore è la densità. Superata la massa critica, l'agglomerato cresce, la gravità prevale sui

moti frenetici delle particelle; il gas compresso si riscalda, la temperatura cresce tanto che, ad un certo momento raggiunge nel suo nocciolo centrale un valore tale che si possono innescare reazioni nucleari con trasformazione di idrogeno in elio. Queste, che sono la maggior fonte dell'energia irraggiata dalla stella nel corso della sua vita, mantengono la temperatura sufficientemente alta, perché la pressione esercitata dal moto delle particelle sia eguale e contraria alla forza di gravità. Quando questo succede, si può dire che la stella è nata, la contrazione si arresta. È raggiunto lo stato di equilibrio idrostatico, la forza di gravità che tenderebbe a far cadere tutta la massa gassosa verso il centro è perfettamente equilibrata dalla forza di pressione del gas che tenderebbe invece a far evaporare tutta la massa nel mezzo circostante. Inoltre la stella è in equilibrio termico, tutta l'energia prodotta ogni secondo dalle reazioni nucleari, viaggia sotto forma di radiazioni attraverso la massa della stella e viene irraggiata ogni secondo nello spazio interstellare. Quindi tanta energia è prodotta tanta ne viene irraggiata. Altrimenti la stella esploderebbe. Una stella è dunque una straordinaria macchina in equilibrio fra due forze opposte; essa produce energia nucleare che irradia sotto forma di luce, calore, onde radio, e nel suo interno trasforma idrogeno in elio. Ma questo perfetto equilibrio e tutte le caratteristiche di una stella, il suo raggio, la sua temperatura superficiale, che insieme ne determinano la luminosità (o splendore intrinseco; lo splendore apparente è quello che misuriamo noi, tanto più debole quanto maggiore è la distanza della

stella), lo svolgersi della sua vita, e la sua durata dipendono dalla sua massa. Le osservazioni e la teoria concordano nel raccontarci la vita di una stella, ma è anche facile capirlo intuitivamente. Teniamo presente che le osservazioni ci dicono che le masse stellari sono comprese fra circa un decimo e circa trenta volte quella del Sole. Più grande è la massa iniziale dell'agglomerato di gas, maggiore dovrà essere la pressione del gas in grado di contrastarla e quindi la temperatura del nocciolo centrale. Ma più alta è la temperatura al centro, maggiore sarà la quantità di energia nucleare prodotta, perché questa è proporzionale a una potenza della temperatura che è pari a circa 5 per le stelle più piccole e circa 20 per le più grosse. Cioè una piccola differenza di temperatura centrale produce una grossa differenza nella produzione di energia. Più energia viene prodotta, maggiore deve essere la superficie di dissipazione e quindi il raggio, per mantenere l'equilibrio termico. Il raggio è compreso fra circa due decimi di quello solare per quelle di massa più piccola e venti volte per quelle di massa maggiore. Nel viaggio attraverso la stella la temperatura scende dai valori centrali di milioni o decine di milioni di gradi a valori circa duemila volte più bassi. Risultato: più grande la massa, maggiore è la temperatura superficiale e maggiore il raggio e di conseguenza maggiore luminosità, che è compresa fra circa un centesimo e diecimila volte quella solare. Tutti questi valori si riferiscono a stelle giovani, non evolute.

Possiamo considerare una stella come una centrale nucleare che produce energia per milioni e miliardi di

anni e la irradia nello spazio, riscaldando e permettendo la vita sui suoi eventuali pianeti.

È evidente che le reazioni nucleari che avvengono nell'interno di una stella ne modificano la composizione chimica e l'intera struttura. Diremo che una stella è giovane, non evoluta fino a che il suo nocciolo è prevalentemente composto di idrogeno. È facile capire come la massa determini la durata di vita di una stella. Una stella di massa pari a venti volte la massa del Sole ha una luminosità diecimila volte più grande. Poiché il suo combustibile nucleare è proporzionale alla massa e lo sperpero di energia proporzionale alla luminosità, potrà irraggiare per un tempo 20/10.000 pari a due millesimi della durata del Sole che è di circa 10 miliardi di anni, e cioè 20 milioni di anni.

Prendiamo l'altro caso estremo, una stella di massa un decimo e luminosità un centesimo di quella solare rispettivamente. Essa avrà a disposizione solo un decimo di combustibile nucleare ma lo sperpererà cento volte più lentamente; quindi potrà brillare inalterata per 0,1/0,01 volte la vita del Sole e cioè 100 miliardi di anni, un tempo molto più lungo dell'attuale età dell'universo di circa 14 miliardi di anni.

Anche lo svolgimento e la fine della vita delle stelle dipende dalla loro massa. Quelle almeno cinque volte la massa del Sole vanno incontro a una fine esplosiva come supernovae e stelle di neutroni, o addirittura per le più grosse come buchi neri, quelle di massa più piccola, di cui fa parte il Sole avranno una fine più tranquilla come nane bianche.

Nel centro di questa straordinaria macchina che è una stella, le reazioni nucleari non avvengono in continuazione con la stessa intensità, ci possono essere irregolari diminuzioni o aumenti di produzione, che vengono però smorzati da una naturale azione termostatica. Una diminuita produzione di energia provoca una diminuzione di temperatura e quindi della forza di pressione del gas; la gravità prevale, la massa di gas tende a cadere verso il centro, lo comprime e lo riscalda quanto basta per ristabilire l'equilibrio. Analogamente un eccesso di produzione d'energia provoca un aumento di temperatura e della forza di pressione del gas che prevale sulla gravità: si ha un inizio di espansione della massa gassosa che raffredda il gas e rallenta la produzione di energia nucleare fino a che non viene ristabilito l'equilibrio. È questo stesso meccanismo che spiega l'evoluzione o in altre parole l'invecchiamento della stella.

Prendiamo ad esempio il nostro Sole. Dopo cinque miliardi di anni nel suo nocciolo c'è ancora abbastanza idrogeno per poter irraggiare in maniera costante per altrettanto tempo. Con Dante il Sole potrebbe dire di essere "a metà del cammin di nostra vita". Fra cinque miliardi di anni l'idrogeno del nocciolo centrale sarà stato trasformato in elio, e l'elio alla temperatura di circa 13 milioni di gradi, che erano sufficienti per trasformare l'idrogeno in elio, è inerte, non utilizzabile come combustibile nucleare. Perché tre nuclei di elio formino un nucleo di carbonio e liberino energia occorrono temperature di 100 milioni di gradi. Il nocciolo privo di fonti energetiche si raffredda,

si ha una contrazione che dapprima riscalda un inviluppo intorno al nocciolo dando luogo al bruciamento dell'idrogeno, ma non sufficiente per fermare il collasso che prosegue fino a che non si raggiungono i 100 milioni di gradi. Ecco che l'elio diventa la nuova fonte di energia nucleare. Ma si ha anche una drastica modifica nella struttura del Sole. Poiché l'energia prodotta cresce rapidamente al crescere della temperatura, che da 13 è passata a 100 milioni di gradi, il Sole deve essere in grado di irraggiare tutto questo eccesso di energia per non esplodere, e per far ciò deve aumentare la sua superficie di almeno 10.000 volte. Ciò significa che il suo raggio aumenterà di 100 volte, lo splendore del Sole di quasi 100 volte e sarà la fine della vita sulla Terra.

Esaurito anche l'elio si avrà un'altra fase di contrazione, ma nel Sole e nelle stelle più piccole o poco più grandi il gas del nocciolo cambia caratteristiche: non è più un gas perfetto, in cui le dimensioni delle particelle sono molto inferiori alla distanza media fra l'una e l'altra e diventa gas degenere. In un gas degenere la pressione che esercita contro la gravità non dipende più dalla temperatura ma solo dalla sua densità. Esaurito un combustibile nucleare il termostato non scatta, perché anche se la temperatura centrale diminuisce, la pressione che il gas esercita contro la gravità resta la stessa, il gas non può riscaldarsi per innescare altre reazioni nucleari. E quindi non avendo più fonti d'energia, la massa stellare seguita ad irraggiare il suo calore nello spazio andando lentamente raffreddandosi. L'esteso e rarefatto inviluppo esterno evapora lentamente

nel mezzo interstellare e del nostro Sole resterà il piccolo e caldo nocciolo centrale – la nana bianca. Una nana bianca è un cadavere ancora caldo, che impiega miliardi di anni a raffreddarsi. Lo stato di gas degenere si può paragonare a quello di un solido, la cui reazione a una compressione dipende solo dalla sua compattezza.

Se la stella è molto più grossa del Sole, il suo nocciolo centrale non diventerà mai degenere, perché lo stato di degenerazione viene raggiunto a densità tanto più alte quanto maggiore è la temperatura. Nelle stelle di massa superiore a una diecina di masse solari la temperatura centrale è tanto alta che il gas non raggiunge mai lo stato degenere. Di conseguenza ogni volta che esauriscono un combustibile nucleare, si innesca il meccanismo termostatico che permette di innescare successivamente tutti i combustibili di cui dispongono. Ad ogni contrazione la temperatura e la densità centrali aumentano e alla fine si forma un nocciolo di nuclei di ferro a temperature di qualche miliardo di gradi e densità pari a miliardi di volte la densità dell'acqua. In queste condizioni il ferro può tramutarsi in elio, ma questa reazione, a differenza di tutte le precedenti, assorbe energia, invece di produrla. Questo assorbimento di energia fa piombare la temperatura centrale da valori di qualche miliardo di gradi a cento milioni, ha dunque un effetto frigorifero, la pressione centrale diminuisce bruscamente e tutta la massa della stella precipita verso il centro comprimendolo fino a formare un nocciolo piccolo e denso, mentre le parti più esterne in cui si trovano elementi in grado di dar luogo a reazioni nucleari produttrici di

energia, grazie al subitaneo riscaldamento prodotto dalla compressione scatenano tutta una serie di reazioni nucleari formando tutti gli elementi che conosciamo in natura. La quantità di energia prodotta è tale che la stella non può irraggiarla tranquillamente, l'equilibrio termico è rotto, la stella esplode, disperdendo nello spazio interstellare gli elementi prodotti nel suo interno: è il fenomeno della supernova. Quello che noi osserviamo è l'improvviso aumento di splendore di un miliardo e più volte di una stella, un aumento tale che la singola stella eguaglia lo splendore dell'intera galassia che la contiene; il gas viene scagliato via a velocità di qualche migliaio di km/sec. Nella posizione in cui documenti storici di secoli fà riportano l'apparizione di una nuova stella è stato quasi sempre trovata una nube di gas in espansione, residuo dell'esplosione stellare. È il caso della nebulosa del Granchio, residuo della nebulosa osservata dai cinesi nel 1054, o delle debolissime nebulose radioemittenti residui della supernova di Tycho Brahe del 1572 e di quella di Keplero del 1604.

In molti resti di supernovae è stata trovata la stella di neutroni, altre forse hanno lasciato un invisibile buco nero, una concentrazione di materia ancora più densa della stella di neutroni, tale che la velocità di fuga da questa regione supererebbe anche quella della luce e quindi anche la luce resta intrappolata dal buco nero.

Una supernova è una vera e propria bomba nucleare, che però invece di essere fonte di morte è fonte di vita, perché è grazie alle supernovae che vengono costruiti tutti gli elementi necessari ai pianeti e agli esseri viventi.

Questo, a grandi linee, è lo svolgimento della vita delle stelle, determinata dalle due forze – gravità e pressione del gas. Oggi, a parte minori dettagli, si conosce molto bene vita e evoluzione delle stelle; è un campo di ricerca maturo, che ha dominato circa tre quarti del XX secolo mentre molto meno bene si conosce come si formano ed evolvono le galassie. Quest'ultimo campo di ricerca ha avuto grandi progressi negli ultimi cinquant'anni, grazie anche ai grandi telescopi realizzati con le nuove tecnologie elettroniche ed informatiche, e i telescopi su satelliti, che hanno reso possibile l'osservazione degli oggetti più deboli e lontani.

## *Galassie e ammassi di galassie: la struttura a grande scala dell'Universo*

La maggior parte delle galassie sono molto lontane e i telescopi classici ce le mostrano come deboli macchioline. Solo con il telescopio spaziale Hubble e coi moderni telescopi a terra di 8 o 10 metri di diametro siamo riusciti a studiare in dettaglio galassie situate a più di 10 miliardi di anni luce che ci mostrano l'aspetto dell'universo di 10 miliardi e più anni fa, quando il Sole non si era ancora formato.

Come nel caso delle stelle anche le galassie presentano una grande varietà di tipi. Ci sono galassie cento volte più brillanti della nostra Via Lattea e altre mille volte più deboli. Per quanto riguarda la forma, conosciamo galassie a spirale, caratterizzate da un nucleo compatto centrale da

cui si dipartono due braccia che si svolgono attorno al nucleo, altre in cui le braccia partono da una specie di sbarra che traversa il nucleo; altre galassie hanno forma sferica o ellittica completamente sprovviste di braccia, altre sono di forma completamente irregolare. Generalmente le spirali sono ricche di nubi di gas e polveri e di stelle di recente formazione, mentre le ellittiche sono sprovviste di nubi e la loro popolazione è composta da stelle in fase avanzata di evoluzione.

Perché questa varietà? Forse queste varietà rappresentano diverse fasi evolutive, oppure le galassie aventi diverse proprietà si sono formate e evolute in modi diversi? Quali sono i meccanismi fisici che spiegano tutte queste diversità?

Queste stesse domande ci si ponevano un secolo fa a proposito delle stelle. Oggi sappiamo che le differenze dipendono esclusivamente dalla loro massa iniziale e in misura molto minore dalla composizione chimica, che determinano tutta la vita della stella. Invece nel caso delle galassie sappiamo ancora molto poco. Quattrocentomila anni dopo l'inizio dell'espansione lo spazio era riempito di materia e radiazione distribuite in modo molto uniforme, con lievi discontinuità di temperatura e densità, ma settecento milioni di anni dopo l'universo mostrava circa la struttura attuale, con le stelle addensate a formare galassie e le più antiche galassie, che vediamo come erano 13 miliardi di anni fa, non troppo diverse da quelle di oggi, situate a pochi milioni di anni luce e che quindi ci mostrano il loro aspetto di pochi milioni di anni fa.

Per ricostruire la storia delle galassie, della loro formazione e evoluzione, dobbiamo confrontare le più lontane ancora osservabili, situate a più di 10 miliardi di anni luce con quelle vicine, situate a qualche milione di anni luce. La scarsa conoscenza che abbiamo ancora su queste grandi famiglie di stelle dipende dal fatto che solo da qualche decennio disponiamo di strumenti abbastanza potenti per potere studiare in dettaglio gli oggetti più lontani. Si stanno progettando telescopi a terra di 20 o 30 metri di diametro e il successore del telescopio spaziale di almeno 10 metri di diametro per arrivare a osservare un'epoca compresa fra 400.000 anni e 700 milioni di anni dall'inizio dell'espansione, e cogliere il momento della nascita delle galassie e delle prime stelle, capire se si sono formate prima le une o le altre, o contemporaneamente.

Quello che sembra abbastanza certo è che l'ambiente in cui si trova una galassia ne condiziona la morfologia. Sappiamo che le galassie fanno parte di grandi famiglie: gli ammassi di galassie. Si osserva che nelle parti più interne e fittamente popolate scarseggiano o mancano del tutto le galassie spirali che invece si trovano nelle parti periferiche dell'ammasso. Si suppone che ciò sia dovuto al fatto che le galassie spirali si incontrino e scontrino e mentre le stelle, a causa della loro grande distanza l'una dall'altra non ne risentono, le nubi di gas e il gas diffuso che popolano le braccia spirali vengono completamente spazzate via nello scontro; così nelle parti interne degli ammassi restano i nuclei centrali di quelle che erano galassie spirali, ridotte ora a galassie sferiche o ellissoidali. Un

altro dato abbastanza certo è la sovrabbondanza rispetto a oggi di galassie popolate da stelle giovani a distanze tali che ci mostrano l'universo com'era fra 4 e 8 miliardi di anni fa, un'evidenza dell'evoluzione subita dalle galassie vicine, meno ricche di stelle giovani.

Ci sono anche indizi che le grandi galassie siano il risultato della fusione con galassie più piccole.

Più la massa di una galassia cresce come risultato di queste fusioni, più cresce la sua capacità di inglobarne altre, un fenomeno di cannibalismo cosmico governato dalla forza di gravità.

Un risultato inaspettato è stata la scoperta della reale distribuzione nello spazio delle galassie. È abbastanza facile stabilire come le galassie sono distribuite sulla volta celeste, ma molto più difficile è conoscere la loro vera distribuzione nello spazio, e cioè anche la loro distanza da noi.

La distanza delle galassie viene misurata grazie alla legge di Hubble stabilita all'inizio degli anni '30: Velocità di allontanamento proporzionale alla distanza. La velocità è indicata dallo spostamento verso il rosso delle righe spettrali, causato dall'espansione dell'universo, quindi per misurarla è necessario ottenere lo spettro della galassia. Fino a una trentina di anni fa per fotografare lo spettro di una debole galassia occorrevano ore di esposizione anche con i più grandi telescopi. Con l'avvento dei rivelatori elettronici è possibile ottenerli con esposizioni di decine di minuti anche con telescopi di media grandezza. Invece che per qualche centinaio di galassie oggi si conosce la distanza di migliaia di oggetti. Si è così scoperto che la

distribuzione delle galassie nello spazio somiglia a quella di una spugna, con le galassie addensate sulla superficie di grandi bolle, il cui diametro è di qualche decina di milioni di anni luce, mentre lo spessore della superficie è inferiore al milione di anni luce. I grandi ammassi di galassie sono situati nelle intersezioni di due bolle adiacenti. Questa struttura a bolle riguarda l'universo locale, cioè oggetti situati entro un miliardo di anni luce, mentre si progetta di estendere la rassegna a galassie molto più lontane, che ci mostrino l'aspetto dell'universo quando la sua età era circa la metà dell'attuale, per vedere se esisteva già e come è evoluta questa struttura spugnosa.

La differenza morfologica fra galassie spirali provviste di un nucleo centrale (il cosiddetto bulge), di un disco o equatore galattico, come la Via Lattea e di braccia spirali, e le galassie ellittiche o sferiche composte dal solo nucleo centrale si ritiene sia determinata dalla forza di gravità e dalla velocità di rotazione dell'agglomerato da cui si è formata la galassia. Se l'agglomerato iniziale che sta collassando sotto l'azione della sua stessa gravità è in rapida rotazione, si formerà un disco in cui la forza centrifuga si oppone alla forza di gravità. Se invece la velocità di rotazione è bassa, la gravità prevale e il collasso si arresta quando la dispersione delle velocità delle singole stelle lo arresta, proprio come nell'interno di una stella il collasso gravitazionale cessa quando la velocità d'agitazione termica del gas esercita una sufficiente forza di pressione contro la gravità. Un ruolo devono averlo anche i campi magnetici delle galassie, ma non sappiamo ancora quale.

Il campo delle ricerche extragalattiche è oggi quello più affascinante e ricco di domande senza risposta. È un campo che solo oggi possiamo affrontare con mezzi sufficientemente potenti.

Da sempre la tecnologia ha condizionato lo sviluppo della ricerca. Limitandosi alle ricerche astrofisiche, nella seconda metà dell'800 e primi anni del '900 la fisica solare era un campo di grande attualità, perché anche con strumenti modesti era possibile studiare la fisica del Sole. Poi è diventata di grande attualità la fisica stellare, campo oggi ben sviluppato e compreso, anche se molti dettagli vanno ancora chiariti; infine i grandi telescopi e i sensibilissimi rivelatori elettronici hanno reso possibile lo studio delle lontane deboli galassie e quindi dell'universo più remoto nel tempo e nello spazio, facendo della cosmologia la scienza che più affascina i giovani ricercatori.

Ma anche campi come la ricerca planetaria, che erano stati trascurati, hanno ripreso nuovo vigore, sia per quanto riguarda la conoscenza del sistema solare, grazie alle sonde e ai robot, sia per i problemi posti sulla formazione dei pianeti, dopo la scoperta di sistemi planetari extrasolari così diversi dal nostro. Competenze di biofisici, geologi e meccanici celesti sono necessarie per rispondere ai problemi sull'origine e diffusione della vita nel cosmo e per una planetologia comparata. Così l'astronomia sta diventando sempre più una multiscienza.

Ci sono campi ancora completamente o quasi completamente inesplorati, come l'astrofisica gravitazionale e l'astrofisica dei neutrini. Se, come previsto dalla relatività

generale, grandi masse in moto danno origine a onde gravitazionali, così come una carica elettrica in moto origina onde elettromagnetiche, riusciremo un giorno a misurare queste debolissime onde causate dallo scontro di due galassie o dal collasso di una supernova. A Càscina, vicino a Pisa è in funzione una gigantesca struttura, l'inteferometro Virgo, una collaborazione italo francese destinato a catturare queste onde gravitazionali, che possiamo visualizzare come increspature dello spaziotempo, propagantesi alla velocità della luce. Che siano estremamente deboli ce lo dice il fatto che delle quattro forze fondamentali che governano l'universo – gravità, elettromagnetismo, interazione debole e interazione forte – posto eguale ad uno l'interazione forte, l'elettromagnetismo è un centesimo, l'interazione debole un milionesimo e la gravità solo un millesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo o $10^{-39}$. Solo le prime due hanno un raggio d'azione praticamente infinito, mentre le altre due hanno un raggio d'azione pari alle dimensioni di un nucleo atomico. Nonostante la sua debolezza la gravità è stata la principale causa della aggregazione della materia a formare stelle e galassie.

Nelle reazioni nucleari che hanno luogo nell'interno delle stelle vengono emessi grandi quantità di neutrini, particelle senza carica e con una massa tanto piccola che sappiamo soltanto che è inferiore a un centomillesimo della massa dell'elettrone. Per queste sue proprietà passa attraverso grandi spessori di materia senza essere arrestata, ed è perciò difficile catturarla e misurarla. Essa

potrebbe darci informazioni dirette sull'interno delle stelle, e anche su i primi istanti di vita dell'universo; né la massa stellare né il muro di luce dell'universo primordiale possono arrestarla. Per ora gli unici corpi celesti da cui abbiamo catturato neutrini sono il Sole e la supernova esplosa nella Grande Nube di Magellano osservata il 24 febbraio 1987.

Sono attualmente in funzione numerose strutture a caccia di neutrini, tutte situate o in profonde miniere o sotto alte montagne, che fungono da filtro, arrestando tutte le altre particelle provenienti dallo spazio cosmico. Fra queste va ricordato il laboratorio italiano situato sotto il Gran Sasso, e un esperimento internazionale a cui partecipa l'Italia con l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) chiamato Antares. Consiste di rivelatori di neutrini situati nel fondo del Mediterraneo a 2500 metri di profondità. Il diametro della Terra funge da filtro per le particelle provenienti dal basso e il mare per quelle provenienti dall'alto, cosicché solo i neutrini passano attraverso il filtro e alcuni di essi vengono catturati.

Mi piacerebbe essere ibernata e risvegliarmi fra un secolo: un futuro abbastanza lontano per aspettarci altri straordinari progressi scientifici, ma abbastanza vicino per riuscire a capire ancora qualcosa di quello che è successo durante il mio sonno.

## *Riferimenti bibliografici*


Alexandr I. Oparin, 1953, *The Origin of Life*, Dover, New York.

Alessandra Celletti e Ettore Perozzi, 2007, *Celestial Mechanics. The Waltz of the Planets*, Springer, Berlin-Heidelberg-New York.

Alessandra Celletti e Ettore Perozzi, 2007, *Ordine e Caos nel sistema solare*, UTET, Torino.

Amedeo Balbi, 2007, *La musica del Big Bang*, Springer Verlag Italia, Milano.

Margherita Hack, 2007, *L'Universo nel terzo millennio*, BUR Rizzoli, Milano.

Mario Ageno, 1991, *Dal non vivente al vivente*, Edizioni Theoria, Roma-Napoli.

Christian de Duve, 2008, *Alle origini della vita*, Longanesi, Milano.

Per Passione
Collana diretta da Sergio Reyes

1. P. Barbella, *Confessioni di una macchina per scrivere. La pubblicità tra visione di marca e visione del mondo*
2. L. Gaffuri, *Intellettuali del giorno dopo. Siamo uomini o professori? Vizi e virtù di un nobile mestiere*
3. L. Russo, *La cultura componibile. Dalla frammentazione alla disgregazione del sapere*
4. M. Hack, *Dal sistema solare ai confini dell'Universo*
5. G. Ferroni, *La passion predominante. Perché la letteratura*

Questo libretto vuol dare un'idea di come l'uomo si è sempre meravigliato davanti allo spettacolo del cielo e si è interrogato fin dall'antichità su cosa erano le stelle, sui loro movimenti, sul loro rapporto con la Terra, di come siamo arrivati, nel corso dei secoli, a imparare a leggere il gran libro della natura, come diceva Galileo.
Idee e pregiudizi di ordine religioso e filosofico sono stati lentamente smantellati dalle osservazioni e dagli esperimenti che hanno caratterizzato la nascita della scienza moderna con Keplero, Galileo, Newton. Nell'800 nasce la moderna astronomia che costruisce gli strumenti e la fisica per interpretare i messaggi contenuti nella luce irradiata dalle stelle e scoprire la loro natura, lo stato della materia di cui sono fatte, le fonti della loro energia, la loro formazione ed evoluzione, tutti problemi che hanno trovato soluzione nel corso del XX secolo.
La scienza spaziale ci ha aperto nuovi insospettati paesaggi e la cosmologia è diventata una scienza osservativa. Inoltre dalla fine del XX secolo a oggi si sono susseguite scoperte di pianeti extrasolari e quindi abbiamo la consapevolezza che nell'Universo esistono miliardi di pianeti e fra questi certamente anche pianeti adatti ad ospitare la vita. Pensare di essere soli nell'Universo sarebbe altrettanto assurdo come credere che la Terra sia il centro dell'Universo, costruito per noi attorno a noi. Le grandi orecchie dei radiotelescopi che partecipano al programma SETI sono in ascolto. Forse un giorno arriverà un segnale da una civiltà aliena. La probabilità è molto bassa, ma se non si tenta diventa zero.

Margherita Hack è nata a Firenze il 12 giugno 1922 e si è laureata in fisica nel gennaio 1945 con una tesi di astrofisica. Ha passato una vita fra le Università di Firenze, Milano e poi di Trieste dove ha vinto la cattedra di astronomia nel 1964 e dove ha diretto il locale osservatorio Astronomico dal '64 all'87 e il Dipartimento di Astronomia dall'85 al '97 portandoli a riconosciuto livello di eccellenza internazionale. È socio nazionale dell'Accademia dei Lincei. Dal '97 è professore emerito dell'Università di Trieste. È membro dell'Unione astronomica internazionale, membro onorario della Società Astronomica Italiana, e membro della Società Italiana di Fisica e della Società Europea di Fisica. È stata membro di vari consigli scientifici della NASA e dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e professore in visita presso varie Università e istituti di ricerca europei e americani.
È autrice di più di 250 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali e una ventina di libri sia di livello universitario che di divulgazione.
Negli anni '40 ha svolto attività atletica a livello agonistico vincendo due campionati universitari nel salto in alto e in lungo ed è arrivata terza a due campionati italiani assoluti.
Nel 1998 le è stato assegnato il premio Sport e Scienza dell'Associazione Nazionale Azzurri d'Italia.
Nel 2004 ha ricevuto il premio Grinzane Cavour per la divulgazione scientifica.